



TUGAS AKHIR TF141581

**ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN
KONFIGURASI SUDU PADA TURBIN ANGIN
SAVONIUS-DARRIEUS DENGAN BERBASIS
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

FARDAN SENTOSA
NRP. 2412 100 114

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT TF141581

**ANALYSIS OF NUMBER AND
CONFIGURATION OF AIRFOIL ON
THE SAVONIUS-DARRIEUS
WIND TURBINE BASED ON
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

FARDAN SENTOSA
NRP. 2412 100 114

Supervisor
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN KONFIGURASI SUDU PADA TURBIN ANGIN SAVONIUS-DARRIEUS DENGAN BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

Oleh :

FARDAN SENTOSA
NRP. 2412 100 114

Surabaya, Januari 2017
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
NIP. 19761223 200501 1 001

Pembimbing II



Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.
NIP. 19880710 201504 2 001



Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN KONFIGURASI SUDU PADA TURBIN ANGIN SAVONIUS-DARRIEUS DENGAN BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

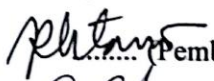




TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

FARDAN SENTOSA
NRP. 2412 100 114

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  (Pembimbing II)
3. Ir. Roekmono, M.T.  (Penguji I)
4. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji II)
5. Ir. Zulkifli, M.Sc.  (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI 2017

ANALISA PENGARUH JUMLAH DAN KONFIGURASI SUDU PADA TURBIN ANGIN SAVONIUS-DARRIEUS DENGAN BERBASIS COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Nama Mahasiswa : Fardan Sentosa
NRP : 2412 100 114
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Pembimbing I : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Pembimbing II : Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstrak

Kekurangan turbin Savonius yang memiliki nilai C_p rendah dan kekurangan turbin Darrieus pada nilai torsi awal yang buruk dapat diminimalisir dengan menggabungkan kedua jenis turbin tersebut. Tujuan tersebut dapat melalui analisis konfigurasi dan jumlah sudu pada turbin Savonius-Darrieus menggunakan simulasi berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulasi dilakukan pada sembilan variasi dengan mengubah jumlah sudu dan konfigurasi pada turbin Savonius dan turbin Darrieus. Variasi dilakukan antara 2 hingga 4 sudu pada kecepatan angin 4 hingga 10 m/s dengan kenaikan setiap 2 m/s. Hasil simulasi menunjukkan turbin Savonius-Darrieus tidak lebih baik daripada turbin Savonius namun lebih baik daripada turbin Darrieus pada bilangan Reynolds yang disimulasikan. Turbin Savonius 3 Darrieus 3 menghasilkan performansi terbaik dengan nilai C_p 0.1825 pada TSR 0.4257 serta nilai self-start 1,8 m/s. Turbin Savonius 4 Darrieus 4 memiliki nilai resultan gaya dan torsi tertinggi karena karakteristik aliran dimana turbin mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan aliran total terbesar sehingga dapat mengekstraksi energi lebih banyak daripada model turbin yang lain.

Kata kunci: turbin Savonius-Darrieus, C_p , gaya, torsi, karakteristik aliran

ANALYSIS OF NUMBER AND CONFIGURATION OF AIRFOIL ON THE SAVONIUS-DARRIEUS WIND TURBINE BASED ON COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Name : Fardan Sentosa
NRP : 2412 100 114
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor I : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Supervisor II : Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstract

Lack of C_p values Savonius turbine and poor starting torque values can be minimalized by combining both of those turbines. For that purpose, configuration and number of Savonius-Darrieus turbine airfoil analyzed by using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The simulation performed on nine variation of airfoil number and configuration of Savonius turbine and Darrieus turbine. Airfoils variation are using 2 to 4 airfoils in wind speed range 4 m/s to 10 m/s with 2 m/s increment. Result of the simulation shown that Savonius-Darrieus turbine cannot performed as good as Savonius turbine but better than Darrieus turbine in simulation wind speed range. Best C_p value is found in Savonius 3 Darrieus 3 turbine with C_p value 0.1825 on TSR value 0.4257 with self-start value in 1,8 m/s. Savonius 4 Darrieus 4 turbine generate highest value in force and torque resultant because flow characteristic that through turbine made the highest pressure distribution and wind velocity, so that the turbine can produce more energy than any other configuration had been made.

Keywords: Savonius-Darrieus turbine, C_p , force, torque, flow characteristic

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur senantiasa terpanjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Agung. Atas berkah, petunjuk, dan karunia-Nya penulis mampu melaksanakan dan menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Analisa Pengaruh Jumlah dan Konfigurasi Sudu pada Turbin Angin Savonius-Darrieus dengan Berbasis *Computational Fluid Dynamics*”.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menyelesaikan tugas akhir ini, penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Agung Sapto, Ibu Nina Martini, Tias Gautama, Niken Rahajeng, dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan do’a serta dukungan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. dan Ibu Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc., selaku pembimbing tugas akhir yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi, dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Andi Rahmadiansah, S.T., M.T. selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi kepada penulis.
4. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua Jurusan Teknik Fisika FTI ITS.
5. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D., selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah mendukung kegiatan simulasi.
6. Bapak Ir. Roekmono, M.T., Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D, dan Ir. Zulkifli, M.Sc. selaku penguji tugas akhir yang telah memberikan banyak masukan untuk perbaikan isi tugas akhir ini.
7. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah banyak memberikan ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang kuliah hingga tugas akhir ini.

8. Zain dan Mbak Erna yang telah banyak menyempatkan waktu untuk berdiskusi tentang simulasi dan topik penelitian ini.
9. Teman-teman seperjuangan mengerjakan tugas akhir, Kiki, Jamal, Irfan, Fianti, Peto, Sahal, dan Alberto.
10. Endah Laksmi Nugraha yang telah membantu secara langsung kegiatan simulasi serta dukungan selama pengerjaan tugas akhir.
11. Teman-teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala bantuannya
12. Teman-teman angkatan 2012, 2013, 2014, dan 2015 lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
13. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam laporan tugas akhir ini, maka dari itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat diharapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Angin	5
2.2 <i>Vertical Axis Wind Turbine</i>	6
2.3 Profil <i>foil</i> dalam Sistem NACA	9
2.4 Konsep Gaya <i>Lift</i> dan Gaya <i>Drag</i>	10
2.5 Karakteristik <i>Wake</i>	12
2.6 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	12
2.7 Model Turbulensi <i>k-omega SST</i>	14
BAB III METODOLOGI	15
3.1 Diagram Alir Penelitian	15
3.2 Pembuatan Geometri	17
3.3 Variasi Variabel Penelitian	20
3.4 <i>Meshing</i>	22
3.5 <i>Preprocessing</i>	23
3.5 <i>Processing</i>	25
3.6 <i>Postprocessing</i>	25
3.7 Validasi Hasil Simulasi	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Validasi Hasil Simulasi	27
4.2 Data Hasil Simulasi CFD	27

4.2.1 Data Turbin Savonius dan Turbin Darrieus	28
4.2.2 Data Resultan Gaya dan Torsi Turbin Savonius-Darrieus	29
4.2.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Angin	37
4.2.3 C_p (<i>Coefficient of Power</i>)	39
4.3 Karakteristik Aliran pada Turbin	40
4.3.1 Karakteristik Kontur Tekanan Aliran	40
4.3.2 Karakteristik Pola Kecepatan Aliran	45
4.3.3 Karakteristik Vektor Kecepatan Aliran	50
4.4 Pembahasan	54
4.4.1 Analisis Perbandingan Turbin Savonius, Turbin Darrieus, Turbin Savonius-Darrieus	54
4.4.2 Analisis Turbin Savonius-Darrieus Terbaik	56
BAB V PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	
BIOGRAFI PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	VAWT Turbines: (a) Savonius; (b) Darrieus ; (c) H-Darrieus	2
Gambar 2.1	Kapasitas kumulatif daya angin dunia	5
Gambar 2.2	Jenis VAWT (a)Turbin angin Darrieus (b)Turbin Angin Savonius	7
Gambar 2.3	Profil foil NACA 0012, 0015, dan 0018	9
Gambar 2.4	Gaya-gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda dua dimensi (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (<i>lift</i> dan <i>drag</i>)	10
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	15
Gambar 3.2	Geometri Turbin Angin Savonius-Darrieus	18
Gambar 3.3	Geometri domain <i>Cylinder</i>	19
Gambar 3.4	Geometri domain <i>Box</i>	19
Gambar 3.5	Geometri Turbin Model I, V, dan IX	21
Gambar 3.6	<i>Mesh</i> pada geometri <i>Box</i> dan <i>Cylinder</i>	22
Gambar 4.1	Perbandingan resultan gaya dengan model turbin	30
Gambar 4.2	Perbandingan resultan torsi dengan model turbin	30
Gambar 4.3	Perbandingan gaya dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 2	32
Gambar 4.4	Perbandingan gaya dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 3	32
Gambar 4.5	Perbandingan gaya dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 4	33
Gambar 4.6	Perbandingan torsi dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 2	33
Gambar 4.7	Perbandingan torsi dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 3	34
Gambar 4.8	Perbandingan torsi dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 4	34
Gambar 4.9	Perbandingan Cd/Ci dengan kecepatan angin	36
Gambar 4.10	Pengaruh kecepatan angin pada gaya turbin	37

Gambar 4.11	Pengaruh kecepatan angin pada torsi turbin	38
Gambar 4.12	Perbandingan C_p dengan TSR	39
Gambar 4.13	Kontur tekanan aliran pada S2 D2 pada Darrieus	41
Gambar 4.14	Kontur tekanan aliran pada S2 D2 pada Savonius	41
Gambar 4.15	Kontur tekanan aliran pada S3 D3 pada Darrieus	42
Gambar 4.16	Kontur tekanan aliran pada S3 D3 pada Savonius	43
Gambar 4.17	Kontur tekanan aliran pada S4 D4 pada Darrieus	44
Gambar 4.18	Kontur tekanan aliran pada S4 D4 pada Savonius	44
Gambar 4.19	Pola Kecepatan aliran pada S2 D2 pada Darrieus	46
Gambar 4.20	Pola Kecepatan aliran pada S2 D2 pada Savonius	46
Gambar 4.21	Pola Kecepatan aliran pada S3 D3 pada Darrieus	47
Gambar 4.22	Pola Kecepatan aliran pada S3 D3 pada Savonius	47
Gambar 4.23	Pola Kecepatan aliran pada S4 D4 pada Darrieus	48
Gambar 4.24	Pola Kecepatan aliran pada S4 D4 pada Savonius	48
Gambar 4.25	Vektor kecepatan aliran pada S2 D2 pada Darrieus	50
Gambar 4.26	Vektor kecepatan aliran pada S2 D2 pada Savonius	51
Gambar 4.27	Vektor kecepatan aliran pada S3 D3 pada Darrieus	51
Gambar 4.28	Vektor kecepatan aliran pada S3 D3 pada Savonius	52
Gambar 4.29	Vektor kecepatan aliran pada S4 D4 pada Darrieus	52

Gambar 4.30	Vektor kecepatan aliran pada S4 D4 pada Savonius	53
Gambar 4.31	Perbandingan nilai C_p pada jenis turbin	55
Gambar 4.32	Selisih hasil TSR pada simulasi kecepatan angin 4 – 10 m/s	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi Turbin	17
Tabel 3.2	Nilai <i>Reynolds Number</i> Turbin	20
Tabel 3.3	Variasi Jumlah dan Konfigurasi Sudu Turbin	21
Tabel 3.4	Ukuran <i>Mesh</i> pada Geometri	23
Tabel 3.5	Penentuan Inisialisasi pada kondisi batas	24
Table 4.1	Hasil self-start turbin Savonius-Darrieus	29

DAFTAR SIMBOL

E_k	Energi kinetik [J]
m	Massa [kg]
v	Kecepatan arus air [m/s]
\dot{m}	Laju massa [kg/s]
ρ	Massa jenis [kg/m ³]
A	Luas penampang melintang [m ²]
P	Daya [W]
F_x	Gaya searah sumbu x [N]
D	Gaya <i>drag</i> [N]
F_y	Gaya searah sumbu y [N]
L	Gaya <i>lift</i> [N]
p	Tekanan [N/m ²]
τ_w	Tegangan geser [N/m ²]
C_D	Koefisien <i>drag</i> [Tidak berdimensi]
C_L	Koefisien <i>lift</i> [Tidak berdimensi]
C_p	Koefisien daya [Tidak berdimensi]
P_T	Daya mekanik turbin [W]
F	Gaya [N]
T	Torsi [Nm]
R	Jari-jari turbin [m]
C_T	Koefisien torsi [Tidak berdimensi]
λ	<i>Tip speed ratio</i> [Tidak berdimensi]
ω	Kecepatan rotasi turbin [rad/s]
σ	<i>Solidity</i> turbin [Tidak berdimensi]
n	Jumlah sudu turbin [Tidak berdimensi]
C	Panjang <i>chord foil</i> [m]
D	Diameter turbin [m]
k	Energi kinetik turbulen tiap satuan massa [m ² /s ²]
μ	Viskositas dinamik [Ns/m ²]
μ_t	Viskositas turbulen [Ns/m ²]
Re	Reynolds Number [Tidak berdimensi]

BAB I

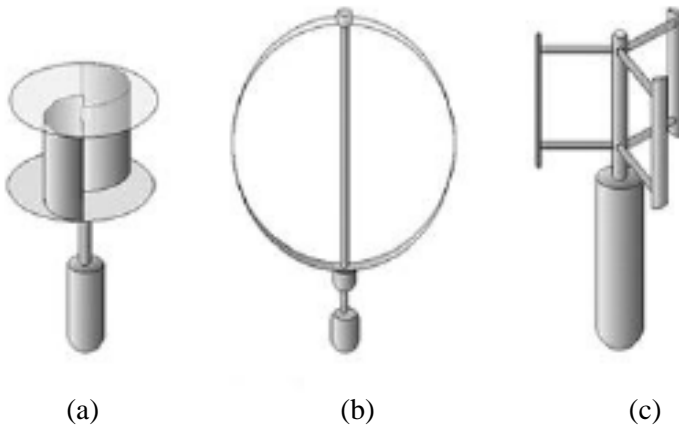
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi terbarukan sebagai sumber energi yang memiliki efektivitas biaya dan tingkat karbon yang rendah menjadi tujuan yang penting dari kebijakan energi dunia (Wenehenubun dkk., 2015). Angin merupakan sumber alternatif energi terbarukan paling potensial. Sumber ini merupakan sumber yang bebas polusi dan tersedia berlimpah di dalam atmosfer bumi. Energi terbarukan seperti angin juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Gupta dkk., 2008). Energi angin dikonversikan menjadi tenaga mekanik oleh sistem konversi energi angin dimana turbin angin menjadi salah satu komponen utamanya. Turbin Angin secara umum dibagi menjadi dua tipe: *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) (Ghosh dkk., 2014).

VAWT memiliki beberapa tipe yang berbeda seperti Savonius dan Darrieus atau H-Darrieus seperti pada gambar 1.1 (Wenehenubun dkk., 2015) . VAWT bekerja dengan baik pada kondisi kecepatan angin rendah seperti pada turbin angin Savonius (Ghosh dkk., 2014). Konsep dari turbin angin Savonius berdasarkan prinsip yang dikembangkan oleh Flettner, yang mana terbentuk dari silinder yang terbagi dua sepanjang permukaan tengah dan digeser ke samping berlawanan arah sepanjang permukaan yang dipotong hingga menyerupai huruf 'S' seperti pada gambar 1.1(a) (Gupta dkk., 2008). Turbin angin Savonius memiliki struktur yang sederhana, karakteristik *starting* yang baik, relatif dioperasikan pada kecepatan angin rendah, dan kemampuan untuk menerima angin dari segala arah (Maldonado dkk., 2014). Berbeda dengan Savonius, turbin angin Darrieus yang memiliki bentuk yang lebih lebar dan efisiensi lebih tinggi daripada Savonius pada kecepatan rotasi tinggi. Efisiensi yang tinggi ini karena Darrieus merupakan turbin angin dengan tipe *lift* berbeda dengan Savonius yang merupakan tipe *drag*. Namun, turbin angin Darrieus memiliki torsi awal yang rendah yang membuat rotor ini tidak berdiri sendiri

dan digunakan dengan dikombinasikan dengan alat yang dapat menghasilkan torsi awal yang tinggi seperti Savonius (Gupta dkk.,2008). Perbedaan karakteristik dari kedua jenis rotor ini dapat digunakan untuk menutupi kekurangan masing – masing turbin dan meningkatkan performansi dari turbin angin tersebut. Performansi turbin angin dapat di tunjukan dari *torque coefficient* (C_T) dan *Coefficient of Power* (C_P) pada perbandingan dengan *tip speed ratio*. Terdapat hubungan antara C_P dan TSR akibat dari soliditas turbin angin (Wenhenubun dkk., 2015). Soliditas turbin angin dipengaruhi oleh jumlah sudu yang menutupi bagian turbin angin. Kombinasi antara turbin angin Savonius-Darrieus sudah dikembangkan untuk memberikan performansi yang baik pada kecepatan angin yang rendah dengan memanfaatkan torsi awal yang baik dari turbin Savonius dan efisiensi yang tinggi dari turbin Darrieus.



Gambar 1.1 VAWT Turbines: (a) Savonius; (b) Darrieus ; (c) H-Darrieus (Frederikus dkk, 2015)

Turbin angin Savonius-Darrieus yang bertujuan untuk meningkatkan performansi turbin dan memberikan nilai torsi yang baik pada awal putaran memiliki beberapa variasi bentuk dan konfigurasi. Jumlah sudu yang digunakan pada penelitian terdahulu juga beragam menyesuaikan ukuran dan kecepatan angin

yang digunakan. Kecepatan angin yang rendah seperti di daerah tropis di Indonesia memerlukan konfigurasi yang tepat agar dapat memanfaatkan potensi yang ada. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis pengaruh jumlah dan konfigurasi sudu pada turbin angin Savonius-Darrieus dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), validasi simulasi akan dilakukan dengan menggunakan studi eksperimen. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi pengaruh jumlah dan konfigurasi sudu pada performansi dan kemampuan *self-start* sehingga memberikan konfigurasi yang terbaik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan dari peneltian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana pengaruh profil aliran udara pada turbin angin Savonius-Darrieus dengan konfigurasi dan jumlah sudu yang berbeda?
- Bagaimana konfigurasi jumlah sudu pada turbin angin Savonius-Darrieus yang menghasilkan performansi terbaik dibandingkan dengan turbin Savonius dan turbin Darrieus?

1.3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah diatas, tujuan dari pelaksanaan program ini adalah sebagai berikut:

- Mengetahui pengaruh profil aliran udara pada turbin angin Savonius-Darrieus dengan konfigurasi dan jumlah sudu yang berbeda.
- Mengetahui konfigurasi jumlah sudu pada turbin angin Savonius-Darrieus rotor yang menghasilkan performansi terbaik dibandingkan dengan turbin Savonius dan turbin Darrieus.

1.4 Batasan Masalah

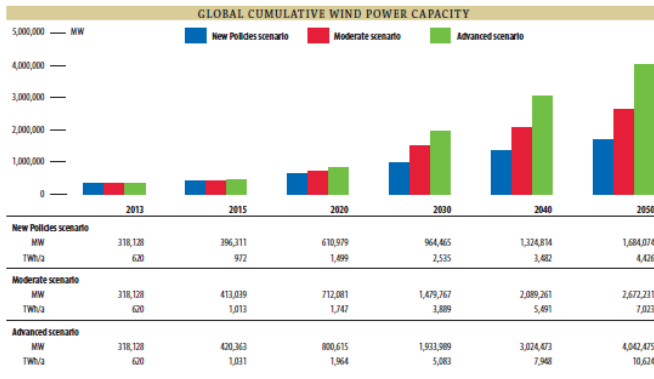
Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir ini diperlukan beberapa batasan masalah diantaranya sebagai berikut:

- Turbin angin yang digunakan adalah turbin angin Savonius-Darrieus dengan 9 variasi jumlah dan konfigurasi dengan dimensi yang sama dengan turbin pada eksperimen
- Tipe *Airfoil* yang digunakan adalah NACA 0018 dengan panjang *chord* 12 mm.
- Pengujian turbin menggunakan *Wind Tunnel Test* dan untuk mengetahui performansi, distribusi tekanan, profil aliran, dan *wake* akan dilakukan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)
- Kecepatan angin yang digunakan pada simulasi adalah 4 – 10 m/s dengan kenaikan 2 m/s.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu energi terbarukan yang sangat potensial untuk digunakan walau pada kecepatan angin yang rendah sekalipun. Turbin angin digunakan untuk mengekstrak energi angin menjadi energi mekanik yang kemudian diubah kembali menjadi energi listrik. Perkembangan energi angin ini sudah sangat luas dengan adanya berbagai jenis turbin angin yang dibuat dan di aplikasikan dengan berbagai ukuran. Global Wind Energy Council (GWEC) dalam laporannya menjelaskan kebijakan dan perencanaan dunia tentang kapasitas energi angin juga sudah terstruktur hingga tahun 2050 dengan beberapa skenario seperti pada gambar 2.1 (GWEC, 2014). Skenario ini menjadi acuan dari kebijakan dunia pada pengembangan energi terbarukan sisi energi angin ini. Pada skenario terendah dunia di tahun 2015 penggunaan energi angin sudah dapat menghasilkan hampir 400 ribu MW, sedangkan di Indonesia sendiri baru mencapai 960 MW di tahun 2014 (ESDM, 2014).



Gambar 2.1 Kapasitas kumulatif daya angin dunia (GWEC, 2014)

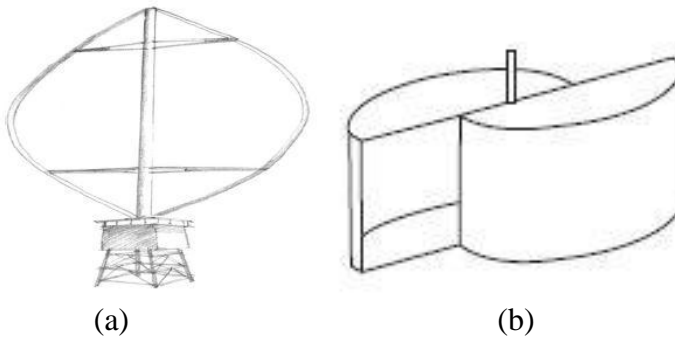
Potensi energi angin yang ada di Indonesia tidak terlalu mendukung untuk turbin angin berskala besar, melainkan hanya kecil dan sedang. Ini dijelaskan pada laporan pengukuran data kecepatan angin di Indonesia oleh kementerian ESDM dimana mayoritas wilayah yang berpotensi adalah di pulau Jawa dan Nusa Tenggara. Kecepatan rata – rata yang dimiliki di daerah tersebut berkisar antara 2 hingga 4,5 m/s pada ketinggian 24 m. Ini terjadi karena pergerakan angin di daerah sekitar garis khatulistiwa cukup rendah. Rendahnya kecepatan angin yang ada dapat dimanfaatkan dengan menggunakan turbin angin dengan skala kecil hingga menengah pula agar dapat maksimal dalam penggunaannya.

Turbin angin skala kecil hingga menengah dapat diaplikasikan menggunakan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Keduanya dapat memiliki memanfaatkan angin kecepatan rendah dan sedang dengan ukuran turbin yang kecil. HAWT lebih umum digunakan secara massal dibandingkan dengan VAWT, namun keduanya memiliki kelebihan dan kekurangan masing – masing yang harus disesuaikan dengan keadaan lapangan. Kedua turbin ini berpotensi pada kecepatan angin yang rendah walau dengan ukuran yang kecil pula. Penggunaan turbin angin secara komersial di Indonesia masih digunakan sebatas penelitian dan beberapa program lembaga penelitian karena masih terkendala beberapa hal seperti pendanaan.

2.2 *Vertical Axis Wind Turbine*

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan turbine angin yang memiliki rotor vertikal. Berbeda dengan HAWT, VAWT memiliki konfigurasi yang lebih sederhana karena mesin konversi yang berada dibawah hingga mudah dalam pemasangan atau perawatan. VAWT juga memiliki kelebihan dapat menerima angin dari segala arah karena bentuk turbin yang melingkar secara vertikal. Dapat menerima angin dari

segala arah ini membuat VAWT ini cukup baik dengan ukuran kecil untuk kecepatan angin rendah. Ukuran dari turbin angin ini diukur berdasarkan *swept area* yang tertutup oleh sudu. *Swept area* ini diukur dari diameter rotor $S=1.000D^2$ dengan *aspect ratio* (ketinggian/diameter) (Paraschivoiu, 2002).



Gambar 2.2 Jenis VAWT (a)Turbin angin Darrieus (b)Turbin Angin Savonius (Gupta dkk, 2008)

VAWT memiliki dua jenis turbin utama yaitu Savonius dan Darrieus seperti pada gambar 2.2. Kedua jenis ini memiliki cara kerja yang berbeda walaupun memiliki arah rotor yang sama. Turbin angin Savonius menggunakan gaya *drag* untuk berputar yang dimana ini akan membuat Savonius mudah berputar dengan kecepatan angin yang rendah sekalipun. Namun, turbin dengan gaya *drag* memiliki kekurangan nilai C_p yang rendah karena memiliki kecepatan putar yang rendah. Turbin angin Darrieus menggunakan gaya *lift* dimana memiliki nilai C_p yang lebih tinggi dibandingkan Savonius (Ramesh & Ahmed, 2011). Namun, memiliki kekurangan membutuhkan kecepatan angin yang tinggi dan memiliki torsi awal yang buruk hingga tidak bisa berdiri sendiri dan dibantu dengan motor atau turbin lain.

Nilai performansi dari VAWT memperhatikan beberapa parameter seperti *Tip Speed Ratio* (TSR), *Coefficient of Power* (C_p), soliditas, torsi, dan daya. Angin yang melewati turbin

akan diekstrak menjadi energi mekanik. Energi yang dapat diekstrak dianggap sebagai efisiensi atau C_p . Nilai C_p yang melewati turbin merupakan perbandingan antara daya keluaran yang dihasilkan rotor dengan daya aliran angin yang secara teoritis dirumuskan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_T}{\frac{1}{2}\rho A v^3} \quad (2.1)$$

P_T adalah daya keluaran dari rotor, ρ adalah densitas dari udara, A adalah area yang tertutup oleh rotor, dan v adalah kecepatan angin. Nilai P_T didapatkan dari perkalian antara torsi dengan kecepatan sudut. Torsi sebuah rotor turbin pada kenyataannya lebih kecil dibandingkan dengan nilai teoritis. Untuk mencari nilai torsi rotor dibutuhkan gaya *thrust* rotor yang dirumuskan sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{2}\rho A v^2 \quad (2.2)$$

Sehingga torsi rotor yang mempunyai jari jari R secara teoritis dirumuskan sebagai berikut:

$$T = \frac{1}{2}\rho A v^2 R \quad (2.3)$$

Torque Coefficient (C_T) yang merupakan perbandingan antara torsi aktual dengan torsi teoritis dirumuskan sebagai berikut:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A v^2 R} \quad (2.4)$$

Untuk menentukan efisiensi interaksi antara kecepatan rotasi rotor dengan kecepatan aliran air dapat dijelaskan melalui *tip speed ratio* (TSR). TSR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.5)$$

TSR juga merupakan perbandingan antara koefisien daya dengan koefisien torsi yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{C_p}{C_T} = \frac{\omega R}{v} = \lambda \quad (2.6)$$

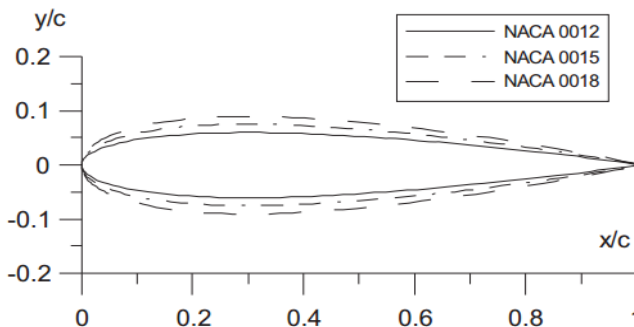
Solidity merupakan tingkat kepadatan turbin. Untuk menentukan nilai *solidity* turbin dengan sudu yang berjumlah n , panjang *chord foil* C , dan diameter turbin D dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{nC}{\pi D} \quad (2.7)$$

2.3 Profil *Foil* dalam Sistem NACA

Airfoil yang digunakan pada turbin merupakan foil NACA. NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) adalah suatu badan atau lembaga bidang aeronautika yang menangani tentang profil *foil*. Profil *foil* dalam sistem NACA didefinisikan dalam seri empat digit. Digit pertama menunjukkan besar maksimum *chamber* sebagai prosentase dari panjang *chord*. Digit kedua menunjukkan jarak maksimum *chamber* terhadap panjang *chord* dari *leading edge* sebagai prosentase dari panjang *chord*. Dua digit terakhir menunjukkan besar maksimum ketebalan *foil* sebagai prosentase dari panjang *chord*.

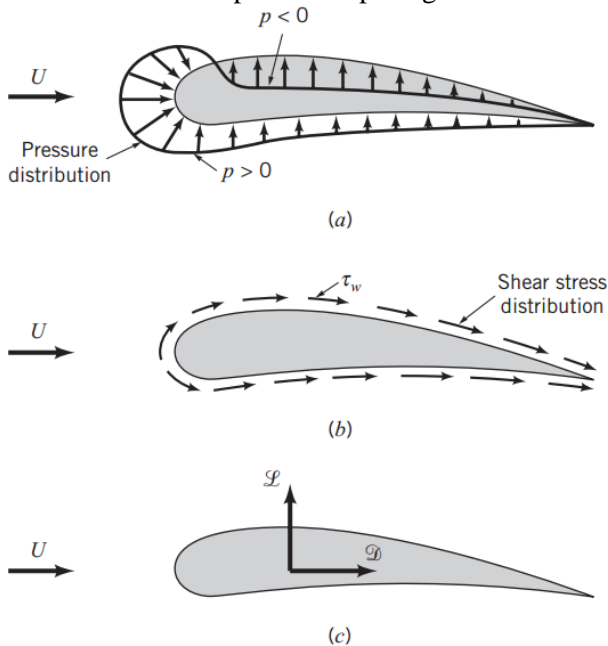
Pada penelitian ini tipe *foil* yang digunakan adalah NACA 0018 yang artinya profil *foil* berbentuk simetris. NACA 0018 memiliki rasio gaya *lift* dan gaya *drag* yang baik (Coiro dkk., 2005). Perbandingan profil *foil* NACA 0018 dengan tipe lainnya dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Profil *foil* NACA 0012, 0015, dan 0018 (Coiro dkk, 2005)

2.4 Konsep *Lift* dan *Drag*

Gaya *lift* dan *drag* merupakan gaya yang dihasilkan akibat dari suatu benda yang bertabrakan dengan fluida. Interaksi tersebut dihasilkan karena adanya tekanan pada permukaan benda. Tegangan normal terjadi karena adanya tekanan dan tegangan geser dinding terjadi karena viskos. Gaya yang terjadi pada benda akibat fluida dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.4 Gaya-gaya dari fluida di sekeliling sebuah benda dua dimensi (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*) (Munson dkk, 2002)

Gaya resultan terbagi menjadi gaya dengan arah yang sejajar dengan kecepatan fluida disebut gaya seret (*drag*) D dan gaya resultan dengan arah yang tegak lurus dengan kecepatan fluida disebut gaya angkat (*lift*) L (Aldo, 2009). Nilai resultan dari tekanan dan tegangan geser dapat diperoleh dengan

mengintegrasikan pengaruh-pengaruh dari kedua besaran tersebut. Untuk melakukan pengintegrasian dan menentukan gaya seret dan gaya angkat maka harus diketahui bentuk benda (yaitu θ sebagai fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi tekanan dan tegangan geser di sepanjang permukaan benda. Komponen x dan y dari gaya fluida pada sebuah elemen kecil dari permukaan benda dirumuskan sebagai berikut:

$$dF_x = (p \, dA) \cos\theta + (\tau_w \, dA) \sin\theta \quad (2.8)$$

$$D = \int dF_x = \int p \cos\theta \, dA + \int \tau_w \sin\theta \, dA \quad (2.9)$$

$$dF_y = -(p \, dA) \sin\theta + (\tau_w \, dA) \cos\theta \quad (2.10)$$

$$L = \int dF_y = - \int p \sin\theta \, dA + \int \tau_w \cos\theta \, dA \quad (2.11)$$

Gaya *drag* dan *lift* dapat juga didefinisikan menggunakan perhitungan numerik yang menggunakan variabel tanpa dimensi yaitu koefisien gaya seret (C_D) dan koefisien gaya angkat (C_L). Selain C_D dan C_L , diperlukan juga nilai massa jenis dari fluida ρ , luas sapuan melintang A dan bergerak dengan kecepatan arus udara v dirumuskan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A v^2} \quad (2.12)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A v^2} \quad (2.13)$$

Nilai C_D dan C_L yang didapatkan kemudian digunakan untuk menghitung nilai gaya *drag* (F_D) dan gaya *lift* (F_L). Kedua gaya tersebut dirumuskan dengan persamaan dibawah ini:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A C_L \quad (2.14)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A C_D \quad (2.15)$$

2.5 Karakteristik Wake

Dalam studi aerodinamika terdapat fenomena yang terjadi saat suatu aliran fluida bertabrakan dengan suatu benda dan menghasilkan pusaran atau turbulensi dibelakang benda tersebut yang disebut olakan atau *wake*. *Wake* pada turbin angin dihasilkan dari putaran turbin yang menghalang aliran angin yang datang. Pada saat energi kinetik angin yang diekstrak oleh turbin angin menjadi daya, *wake* akan terbentuk dengan berkurangnya kecepatan angin yang lewat dan meningkatnya turbulensi (Peng, 2016). Karakteristik *wake* tersusun dari interaksi *vortex* yang sangat kompleks. Selain itu juga terjadi *turbulence mixing* antara aliran *downstream* yang memiliki kecepatan rendah dengan aliran *freestream* yang memiliki kecepatan tinggi. Hal tersebut menyebabkan terjadinya pertukaran energi dan momentum dari aliran *freestream* menuju aliran *downstream* atau aliran yang sudah terpengaruh oleh *wake* (Bartl, 2011).

Wake dipengaruhi oleh beberapa faktor dan salah satu yang paling berpengaruh adalah bilangan Reynolds. Secara umum, semakin besar bilangan Reynoldsnya, semakin kecil daerah didalam medan aliran dimana efek viskos menjadi penting (Munson,2002). Dengan begitu semakin tinggi bilangan reynoldsnya akan semakin tinggi tingkat turbulensi *wake* yang dihasilkan oleh suatu aliran. *Wake* yang terbentuk dibelakang turbin akan terjadi turbulensi di belakang turbin tepat yang disebut *near wake* dan kemudian akan terus menjauh dan kembali bertabrakan dengan *freestream* ataupun *wake* lain yang disebut dengan *far wake*. Apabila *wake* ini kembali berinteraksi dengan turbin maka akan menghasilkan gaya pada turbin tersebut.

2.6 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan ilmu yang digunakan untuk memprediksi aliran fluida, transfer massa dan panas, dan fenomena lain yang menggunakan

persamaan matematika berdasarkan *finite element*. Pada CFD digunakan persamaan kekekalan massa, kekekalan energi, dan kekekalan momentum untuk menghasilkan data prediksi yang dibutuhkan seperti tekanan, kecepatan, temperatur, dan vektor. Geometri yang disimulasikan akan dibagi menjadi bagian – bagian kecil yang disebut dengan kontrol volume. Di setiap kontrol volume ini akan dilakukan perhitungan matematis. Semakin banyak kontrol volume yang dibuat maka akan semakin banyak juga perhitungan yang dilakukan dan menyebabkan kerja komputer yang semakin berat.

Dalam melakukan simulasi menggunakan CFD, terdapat tiga tahapan yang harus dilaksanakan yaitu:

- *Pre-Processing*
Pada tahap ini dilakukan pembentukan geometri yang akan di simulasikan dan pendefinisian *boundary condition*. Pembuatan geometri dapat menggunakan *software* GAMBIT, Solidwork, dan lain sebagainya yang merupakan *software* sejenis. Proses setelah geometri yaitu *meshing*, *meshing* adalah proses pembagian geometri menjadi kontrol volume kecil yang menjadi tempat perhitungan matematis. Semakin banyak kontrol volume yang dibuat maka akan semakin halus pula hasil yang didapatkan.
- *Processing*
Pada tahap ini akan dihitung data – data yang sudah di masukan sebelumnya secara iterasi menggunakan persamaan turbulensi dan lain sebagainya untuk mendapatkan suatu prediksi nilai. Iterasi dilakukan hingga perhitungan konvergen dan memenuhi nilai error yang sudah ditentukan sebelumnya.
- *Post-Processing*
Tahap terakhir ini adalah tahap dimana data hasil perhitungan inisialisasi kondisi yang dapat dilihat dalam beberapa bentuk seperti nilai, grafik, gambar, dan animasi dengan pola warna tertentu.

2.7 Model Turbulensi *k-omega SST*

Fluktuasi pada kecepatan, momentum, energi, temperature, dan lain sebagainya membutuhkan pendekatan matematis untuk menyelesaikan permasalahan pada aliran tersebut. Pendekatan matematis yang digunakan untuk aliran fluida disebut sebagai model turbulensi. Salah satu model turbulensi yang umum digunakan yaitu *k-omega SST*.

Model turbulensi *k-omega* dikembangkan oleh Wilcox dimana persamaan ini menyelesaikan dua *transport equation*. Dua *transport equation* itu adalah satu untuk *turbulent kinetic energy*, k , dan satu untuk *turbulent frequency*, ω . Tegangan permukaan dihitung dengan konsep *eddy-viscosity*. Berikut merupakan persamaan $k-\omega$.

$$\begin{aligned} & k \text{ equation} \\ \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \\ & \beta' \rho k \omega + P_{kb} \end{aligned} \quad (2.16)$$

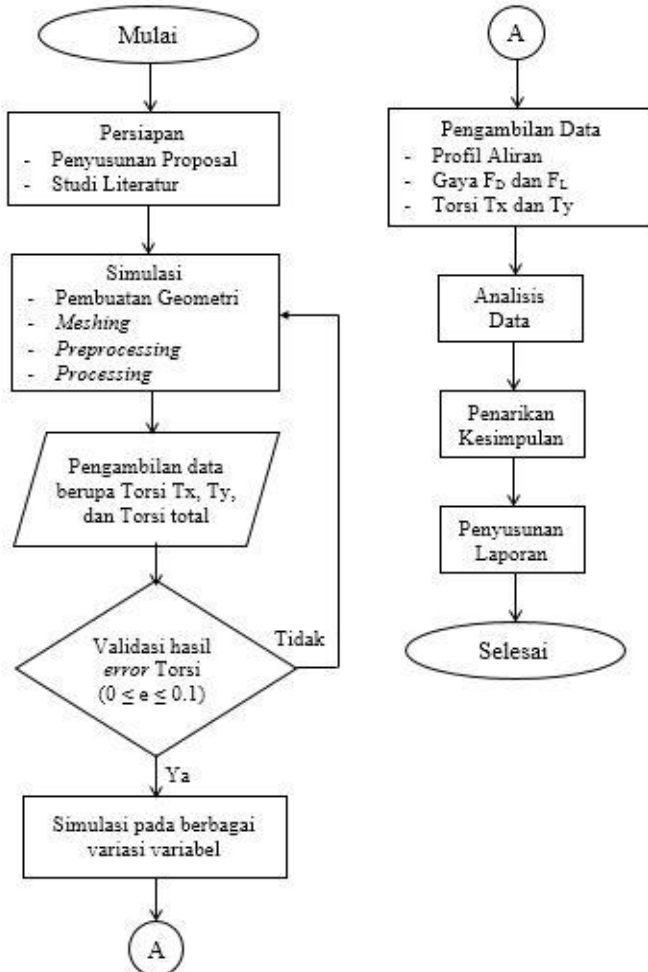
$$\begin{aligned} & \omega \text{ equation} \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) &= \frac{\partial}{\partial x_\omega} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \\ & \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \end{aligned} \quad (2.17)$$

$k-\omega$ yang berbasis SST menghitung turbulensi tegangan pada permukaan dan memberikan prediksi yang akurat dalam pemisahan aliran oleh benda tipis dibawah perbedaan tekanan. Model SST telah dirancang untuk menghindari sensitivitas *freestream* dari model $k-\omega$ standar, dengan menggabungkan unsur – unsur persamaan ω dan ϵ . Selain itu, model SST telah dikalibrasi secara akurat untuk menghitung pemisahan aliran pada permukaan halus. Model SST merupakan salah satu yang paling banyak digunakan untuk aliran aerodinamika.

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian Turbin angin Savonius-Darrieus ini memiliki tahapan – tahapan pelaksanaan seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Penelitian ini diawali dengan tahap persiapan yang meliputi penyusunan proposal dan studi literatur. Penyusunan proposal bertujuan untuk memaparkan garis besar dari penelitian yang akan dilakukan beserta jadwal pelaksanaan penelitian. Garis besar penelitian yang terdapat pada proposal dan yang akan dilakukan didasari oleh studi literatur. Studi literatur yang dilakukan pada penelitian ini terkait dengan *Vertical Axis Wind Turbine*, *NACA Airfoil*, Konsep gaya *Lift* dan gaya *Drag*, Karakteristik turbulensi aliran, *Computational Fluid Dynamics* dan persamaan turbulensi. Studi literatur didapat dari beberapa sumber yang dapat dipertanggungjawabkan seperti buku dan jurnal internasional.

Tahap selanjutnya pada penelitian ini yaitu tahap simulasi. Tahap simulasi dilakukan dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics*. Simulasi ini memiliki beberapa tahap yaitu pembuatan geometri turbin, *meshing*, *preprocessing*, *processing* dan *postprocessing*. Simulasi yang dilakukan harus sesuai dengan keadaan sebenarnya atau dalam hal ini adalah eksperimen melalui tahap validasi. Tahap validasi dilakukan dengan menyesuaikan kondisi batas pada eksperimen dan nilai torsi yang dihasilkan. Nilai torsi yang dibandingkan adalah nilai torsi pada salah satu variasi turbin. Deviasi pada simulasi dan eksperimen tidak boleh lebih dari 10% agar kondisi simulasi dapat dianggap mendekati keadaan sebenarnya.

Simulasi dengan data yang sudah divalidasi dapat dilanjutkan untuk simulasi berbagai variasi variabel yang sudah ditentukan sebelumnya. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu jumlah dan konfigurasi sudu pada turbin angin Savonius-Darrieus dan kecepatan angin. Apabila simulasi telah selesai maka dilakukan pengambilan data berupa torsi, gaya, dan karakteristik aliran yang melalui turbin seperti kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran. Data tersebut dianalisis sesuai dengan tujuan penelitian. Setelah dianalisis maka dilakukan penarikan kesimpulan serta penyusunan laporan.

3.2 Pembuatan Geometri

Turbin angin yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Vertical Axis Wind Turbine* Savonius-Darrieus. Geometri turbin yang dibuat terbagi menjadi Darrieus, Savonius dengan *end plate*, dan *shaft*. Tipe sudu yang digunakan pada Darrieus yaitu NACA 0018. Spesifikasi turbin dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 3.1 Spesifikasi Turbin

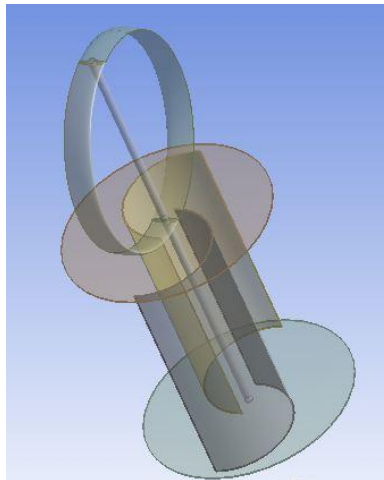
No	Besaran	Nilai
1	Diameter Turbin	9 cm
2	Tinggi Turbin	19 cm
3	Panjang <i>Shaft</i>	19 cm
4	Diameter <i>Shaft</i>	0.35 cm
5	Diameter Darrieus	9 cm
6	Panjang <i>Chord</i> Sudu	1.2 cm
7	Diameter Savonius	4.9 cm
8	Tinggi Savonius	10 cm
9	Diameter <i>End Plate</i>	9 cm

Pembuatan geometri dimulai dengan membuat sudu Darrieus dengan memasukkan titik (*point*) NACA 0018 yang sudah diatur dengan panjang *chord* sebesar 1.2 cm dalam bentuk .txt. Titik tersebut dimasukkan kedalam *Design Modeler* dengan fitur import. Kemudian dibuat garis (*line*) dan permukaan (*surface*) yang mengikuti titik sebelumnya. Setelah menjadi permukaan, sudu ini dirubah dalam bentuk benda (*body*) dengan bentuk seperti pada spesifikasi dengan jumlah yang berbeda pada setiap variasi. Sudu Darrieus yang sudah terbentuk dipindah pada posisi ketinggian yang diinginkan.

Geometri selanjutnya yaitu sudu Savonius yang berada dibawah sudu Darrieus. Savonius dibuat dari setengah lingkaran yang dibuat menjadi benda dengan menambahkan ketebalan sebesar 0.05 cm. Savonius yang sudah terbentuk dipindahkan pada posisi yang diinginkan dan diberi *end plate* pada bagian atas dan

bawah dari Savonius tersebut. *End Plate* terbuat dari lingkaran yang dirubah menjadi benda dengan ketebalan yang sama dengan Savonius yaitu 0.05 cm.

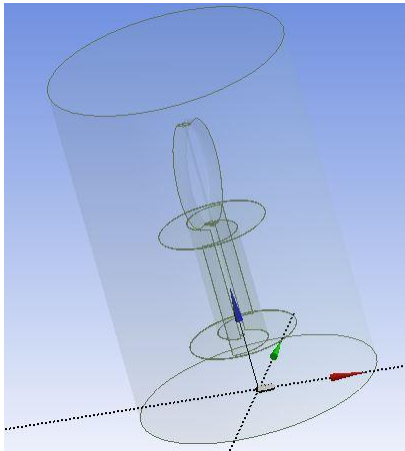
Bagian terakhir yaitu *shaft* dari turbin yang berupa silinder memanjang dari Darrieus hingga *end plate* bawah. *Shaft* dibuat dengan diameter 0.35 cm. *Shaft* digunakan sebagai aksis pemutar turbin saat dalam tahap *processing*. Turbin yang terpotong bagiannya oleh *shaft* akan di potong sebetuk dengan *shaft* tersebut. Bentuk turbin yang sudah lengkap seperti pada gambar 3.2.



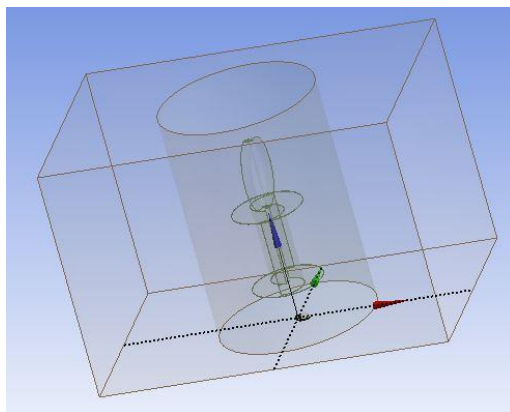
Gambar 3.2 Geometri Turbin Angin Savonius-Darrieus

Tahap selanjutnya adalah pembuatan geometri domain udara yang akan digunakan. Domain udara yang dibuat menjadi *Cylinder* dan *Box*. Domain *Cylinder* dibuat berbentuk tabung dengan diameter 20 cm menyelimuti domain turbin. *Cylinder* yang sudah dibuat kemudian dipotong (*subtract*) menggunakan domain turbin yang dibuat sehingga meninggalkan permukaan (*face*) dengan bentuk yang sama dengan turbin. Permukaan yang berbentuk turbin ini yang nantinya akan diputar dengan kecepatan tertentu untuk mendapatkan nilai yang sesuai dengan tujuan.

Domain udara yang selanjutnya dibuat dengan berbentuk balok dengan panjang x lebar x tinggi yaitu 45 cm x 30 cm x 30 cm mengikuti dimensi *Wind Tunnel* yang digunakan pada eksperimen. Domain *box* ini menyelimuti domain *cylinder* yang dibuat sebelumnya. Kemudian domain *box* ini dipotong sesuai dengan *cylinder* namun tetap meninggalkan *cylinder* diantara *box* yang dibuat. Domain *cylinder* dan *box* yang sudah terbentuk terlihat seperti pada gambar 3.3 dan 3.4



Gambar 3.3 Geometri domain *Cylinder*



Gambar 3.4 Geometri domain *Box*

3.3 Variasi Variabel Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa variasi variabel pada turbin angin Savonius-Darrieus. Variabel yang divariasikan yaitu jumlah sudu pada savonius dan darrieus serta konfigurasi. Kecepatan angin yang divariasikan disesuaikan dengan kecepatan angin pada daerah Indonesia antara 1 – 2,5 m/s. Turbin yang disimulasikan merupakan skala kecil 1:1 dengan turbin pada *wind tunnel* maka digunakan perhitungan *Reynold Number* untuk menyesuaikan efek aliran yang diterima dan dihasilkan turbin. Persamaan *Reynold Number* yang digunakan adalah persamaan berikut ini.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (3.1)$$

Dengan perhitungan *Reynold Number* untuk turbin berukuran kecil, maka didapatkan nilai kecepatan angin yang digunakan adalah 4 – 10 m/s dengan kenaikan setiap 2 m/s. Variasi kecepatan ini menyesuaikan dengan eksperimen yang dilakukan pada *Wind Tunnel*. Nilai ρ yang digunakan pada perhitungan adalah massa jenis udara pada 25° C. Nilai u adalah kecepatan angin. Nilai μ adalah viskositas udara. Nilai L adalah diameter dari turbin. Berikut adalah nilai *Reynolds Number* dari kecepatan yang disimulasikan.

Tabel 3.2 Nilai *Reynolds Number* Turbin

Re	Turbin	
	L (m)	u (m/s)
23,401.95	0.09	4
35,102.92	0.09	6
46,803.90	0.09	8
58,504.57	0.09	10

Variasi jumlah dan konfigurasi sudu pada turbin dilakukan dengan sembilan variasi. Variasi tersebut memiliki sudu antara 2 – 4 pada setiap jenis turbin yang digunakan dalam hal ini yaitu Savonius dan Darrieus. Spesifikasi dari masing – masing turbin

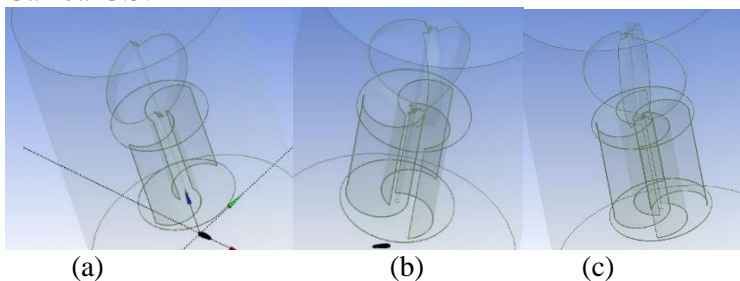
sama dengan spesifikasi umum yang dijelaskan pada subbab 3.1. Perbedaanannya yaitu pada jarak antara sudu yang dipasang pada setiap jenisnya. Variasi kesembilan turbin tersebut dapat dilihat pada tabel 3.2.

Geometri juga dibuat menyesuaikan variasi model turbin yang akan diuji. Total dari variasi turbin yang disimulasikan adalah berjumlah 456 simulasi. Setiap simulasi dimasukan input nilai kecepatan putar dan kecepatan angin pada sudut azimuth tertentu.

Tabel 3.3 Variasi jumlah dan konfigurasi sudu turbin

Variasi Turbin	Jumlah Sudu tipe Savonius	Sudut Antar Sudu	Jumlah Sudu tipe Darrieus	Sudut Antar Sudu
Model I	2	180°	2	180°
Model II	2	180°	3	120°
Model III	2	180°	4	90°
Model IV	3	120°	2	180°
Model V	3	120°	3	120°
Model VI	3	120°	4	90°
Model VII	4	90°	2	180°
Model VIII	4	90°	3	120°
Model IX	4	90°	4	90°

Geometri turbin pada model I, V, dan IX dapat dilihat pada Gambar 3.5.



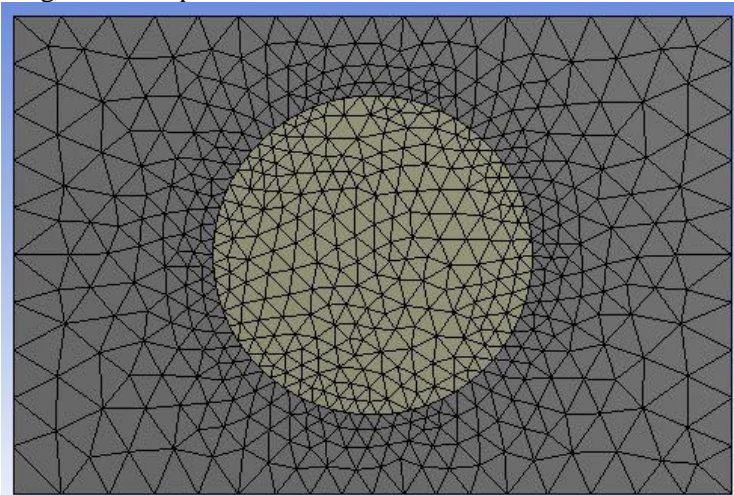
Gambar 3.5 Geometri Turbin Model I, V, dan IX

3.4 Meshing

Meshing dilakukan setelah semua geometri sudah dibuat pada *design modeler*. *Meshing* merupakan tahap dimana domain yang sudah dibuat dibagi menjadi bagian – bagian kecil sebagai tempat untuk dilakukan perhitungan. Bagian kecil ini disebut sebagai *control volume* yang akan dilakukan perhitungan persamaan konservasi energi, massa, momentum, dan persamaan lainnya dalam *software CFD*.

Meshing dilakukan untuk membuat perhitungan pada saat *processing* menjadi lebih detail dan akurat. Semakin kecil ukuran bagian tersebut maka akan semakin banyak pula perhitungan yang dilakukan yang membuat data yang dihasilkan lebih akurat walau membuat beban komputasi lebih berat. *Mesh* bukan hanya diperhatikan dari ukuran tetapi juga bentuk. Bentuk dan ukuran yang sesuai dibutuhkan untuk membuat simulasi yang baik dan sesuai dengan penelitian yang dilakukan. Bentuk *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *tetrahedral* dengan ukuran yang beragam tergantung tempat yang lebih membutuhkan.

Mesh yang dibuat pada penelitian ini memiliki ukuran yang dibagi menjadi 4 bagian. Bagian tersebut yaitu seperti pada gambar 3.6 dengan ukuran pada tabel 3.4.



Gambar 3.6 *Mesh* pada geometri *Box* dan *Cylinder*

Tabel 3.4 Ukuran *Mesh* pada Geometri

No	Nama Bagian	Ukuran <i>Mesh</i>
1	Domain <i>Box</i>	3 cm
2	Domain <i>Cylinder</i>	3 cm
3	<i>Box Interface</i> dan <i>Cyl Interface</i>	1 cm
4	<i>Face Turbin</i>	0.2 cm

3.5 Preprocessing

Preprocessing merupakan tahap simulasi dimana kondisi batas (*boundary condition*) ditentukan. Kondisi batas yang digunakan harus sesuai dengan kondisi batas sebenarnya pada eksperimen agar menghasilkan hasil yang sesuai pula. Kondisi batas yang digunakan pada simulasi ini yaitu sebagai berikut:

Kondisi batas

- Turbin : *Wall*
- Udara (atas dan bawah) : *Wall*
- *Cylinder* (atas dan bawah) : *Wall*
- Aliran masuk : *Inlet*
- Aliran kanan, dan kiri : *Wall*
- Aliran keluar: *Opening*
- *Cylinder* : *Interface*

Kondisi kontinyu

- Volume Udara : *Fluid*
- Volume *cylinder* : *Fluid*

Selain kondisi batas, pada *preprocessing* juga didefinisikan sifat yang dimiliki pada batas – batas tersebut. Nilai parameter *input* dan *output*, metode perhitungan dan parameter lain yang terkait dengan simulasi ataupun kondisi geometri. Simulasi yang dilakukan merupakan simulasi *Steady state*, dimana simulasi ini akan menghitung satu keadaan hingga keadaan tersebut *steady*.

Pada penelitian ini diberikan input nilai kecepatan sudut yang didapat dari eksperimen. Nilai tersebut digunakan untuk menyesuaikan dengan inisial kondisi eksperimen. Ditentukan pula poros putar turbin pada sumbu z. Dari input ini maka akan

dihasilkan simulasi yang menunjukkan putaran turbin setiap sudut *azimuth* 30 derajat.

Inisialisasi yang diberikan pada simulasi ini terdapat pada kondisi batas yang sudah ditentukan sebelumnya. Pada kondisi batas ini diberi inisialisasi agar didapatkan hasil yang sesuai dengan eksperimen. Apabila terdapat kesalahan pada memberi kondisi batas akan menyebabkan data tidak sesuai namun tetap mengeluarkan hasil. Data kondisi batas yang dimasukan ditampilkan lebih detail pada tabel 3.5.

Tabel 3.5. Penentuan Inisialisasi pada kondisi batas

No	Kondisi Batas	Inisialisasi
1	<i>Turbin Face</i>	<i>No slip, rotating wall axis z, kecepatan putar (RPM)</i>
2	<i>CylWall dan BoxWall</i>	<i>Free slip</i>
3	<i>Cyl Interface dan Box Interface</i>	Fluid – fluid
4	<i>Inlet</i>	<i>Velocity</i>
5	<i>Outlet</i>	<i>Medium turbulence</i>

Salah satu bagian *preprocessing* yang penting adalah persamaan turbulensi yang diberikan untuk menghitung setiap *mesh* yang dibuat. Pada penelitian ini digunakan model turbulensi *k-omega SST*. Model turbulensi *k-omega SST* digunakan karena dapat memprediksi hasil yang baik untuk permukaan tipis seperti sudu. Model turbulensi *k-omega SST* merupakan model yang menyelesaikan dua persamaan yaitu persamaan energi kinetik turbulen dan persamaan laju disipasi turbulen. *k-omega SST* juga memiliki kelebihan yaitu beban komputasi yang dibutuhkan cukup kecil sehingga tidak terlalu lama dalam *processing*.

Perhitungan yang dilakukan harus memiliki nilai *error* yang rendah, oleh karena itu simulasi yang dilakukan harus konvergen. Konvergen pada perhitungan simulasi ditentukan oleh kriteria konvergensi. Nilai kriteria konvergensi yang digunakan adalah RMS (*Root Mean Square*) *residual error*. Nilai ini dapat ditentukan

sesuai kebutuhan. Deviasi pada simulasi ini tidak boleh lebih dari 10% maka diambil nilai RMS 0.001 untuk hasil yang akurat.

3.6 Processing

Processing adalah proses perhitungan berdasarkan geometri, *meshing*, pendefinisian kondisi batas, serta penentuan inisialisasi yang telah diatur. Proses perhitungan dilakukan hingga mencapai batas nilai *error* yang telah ditentukan sesuai dengan kriteria konvergensi yang digunakan pada simulasi. Didalam penelitian ini, simulasi dinyatakan konvergen ketika mencapai nilai *residual error* sebesar 0.001.

3.7 Postprocessing

Proses terakhir pada tahapan simulasi ini adalah tahap *post processing*. Pada tahap ini dilakukan pengambilan data hasil simulasi berupa nilai gaya dan torsi. Nilai gaya yang didapatkan meliputi gaya x, gaya y, dan gaya z. sama hal nya untuk nilai torsi yang diambil meliputi torsi x, torsi y dan torsi z. Selain pengambilan data berupa nilai juga dilakukan visualisasi hasil simulasi berupa karakteristik aliran yang melalui turbin. Visualisasi hasil simulasi meliputi kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran dan vektor kecepatan aliran.

Data F_x dan F_y yang diambil kemudian dirubah menjadi F_d dan F_l sesuai dengan posisi sudut azimuth sudu. Perhitungan F_l dan F_d dilakukan pada setiap sudu yang disimulasikan. Data T_x dan T_y serta F_d dan F_l kemudian di resultan agar menjadi nilai torsi resultan dan gaya resultan sudu. Data setiap sudu dan *shaft* kemudian dijumlah untuk mendapatkan nilai torsi total dan gaya total turbin secara keseluruhan.

Nilai F_d dan F_l dihitung sesuai dengan sudut azimuth dari sudu. Nilai tersebut didapatkan dengan menggunakan persamaan aerodinamika sebagai berikut

$$F_l = F_y \cos \alpha - F_d \sin \alpha \quad (3.1)$$

$$F_d = F_y \sin \alpha + F_x \cos \alpha \quad (3.2)$$

Pada nilai torsi, selain diambil nilai T_x dan T_y , diambil pula nilai torsi aerodinamika yang digunakan untuk menghitung nilai C_p . Torsi aerodinamika didapatkan dari nilai kecepatan tangensial pada sudu dan *shaft*. Nilai kecepatan tersebut dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut untuk dapat diambil nilai torsinya.

$$T_{aerodinamika} = \rho A v R_m (V_{t2} - V_{t1}) \quad (3.3)$$

Pada persamaan diatas ρ adalah massa jenis fluida, A adalah luas sapuan turbin, v adalah kecepatan aliran, R_m adalah jari – jari momen, V_{t2} adalah kecepatan tangensial pada sudu, V_{t1} adalah kecepatan tangensial pada *shaft*.

3.8 Validasi Hasil Simulasi

Setelah didapatkan data hasil simulasi berupa nilai torsi, tahap selanjutnya adalah melakukan validasi data hasil simulasi dengan data yang didapatkan dari hasil eksperimen. Apabila deviasi torsi yang dihasilkan memiliki nilai lebih besar dari 10% maka harus dilakukan simulasi ulang. Simulasi ulang yang dilakukan dengan mengubah ukuran *mesh* atau kondisi batas. Ukuran *mesh* dan kondisi batas akan dianggap mendekati keadaan sebenarnya ketika memiliki nilai deviasi kurang dari 10%. Sehingga ukuran *mesh* dan kondisi batas tersebut dapat digunakan untuk simulasi pada berbagai variasi dalam penelitian ini.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Penelitian yang berbasis simulasi diperlukan adanya tahapan validasi untuk memastikan data yang diambil merupakan data yang benar. Data yang dianggap benar adalah data yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Pada penelitian ini validasi dilakukan dengan membandingkan nilai torsi turbin yang didapat dari simulasi dengan yang didapat oleh eksperimen. Kondisi batas simulasi juga disesuaikan dengan kondisi batas yang terdapat pada eksperimen menggunakan Wind Tunnel. Validasi juga meninjau ukuran mesh yang digunakan saat simulasi untuk mengetahui seberapa detail perhitungan simulasi. Penggunaan persamaan perhitungan simulasi yang tepat juga menjadi dasar bahwa simulasi ini menggunakan proses yang benar. Validasi pada penelitian ini dilakukan pada salah satu sampel model turbin pada kecepatan angin tertentu.

Validasi dilakukan pada model turbin Savonius-Darrieus dengan jumlah sudu Savonius 3 dan Darrieus 2 dengan kecepatan angin 4 m/s. Jumlah mesh yang digunakan pada simulasi ini adalah 8.933.043. Persamaan turbulensi yang digunakan untuk perhitungan merupakan k-omega SST yang baik untuk memprediksi aliran fluida pada permukaan tipis seperti sudu Darrieus dan Savonius. Nilai torsi yang didapatkan dari hasil eksperimen yaitu 0.0126 Nm dan nilai dari hasil simulasi yaitu 0.0136 Nm dengan nilai deviasi 8.1% lebih besar dibandingkan dengan eksperimen. Dengan nilai deviasi torsi yang kurang dari 10% maka simulasi ini telah tervalidasi. Dari hasil validasi diatas maka dapat dilakukan simulasi pada semua variasi model dan kecepatan angin.

4.2 Data Hasil Simulasi CFD

Data yang didapatkan dari eksperimen adalah data kecepatan angin dan kecepatan putar turbin. Data tersebut digunakan sebagai inisialisasi kondisi batas pada simulasi. Data yang dihasilkan simulasi kemudian dilihat pada tahap *postprocessing*. Pada tahap

postprocessing didapatkan hasil berupa nilai torsi, gaya, kontur tekanan, profil aliran kecepatan, dan vector kecepatan pada permukaan turbin. Nilai torsi yang didapat berupa T_x dan T_y pada setiap sudu yang akan diresultan menjadi torsi turbin. Torsi turbin akan digunakan untuk menentukan nilai koefisien daya (C_p). Begitu pula data gaya yang didapat adalah gaya F_x dan F_y yang akan dihitung menjadi F_D dan F_L yang kemudian diresultan menjadi gaya turbin secara keseluruhan. Gaya F_D dan F_L akan digunakan untuk menentukan nilai koefisien drag dan koefisien lift yang digunakan untuk menganalisis pengaruh dari masing – masing jenis turbin. Hasil analisa gaya dan torsi akan diamati pada sudut azimuth dan kecepatan angin yang berbeda.

4.2.1 Data Turbin Savonius dan Turbin Darrieus

Simulasi dilakukan pada turbin angin Savonius dan turbin angin Darrieus sebagai dasar dan pembandingan data turbin angin Savonius-Darrieus. Turbin angin Savonius yang disimulasikan memiliki 2 sudu, ketinggian dan diameter yang sama dengan turbin yang lain. 2 sudu dipilih karena memiliki nilai performansi tertinggi untuk turbin Savonius. Turbin Darrieus menggunakan 3 sudu dengan alasan yang sama yaitu performansi yang baik diantara 2 sudu atau 4 sudu. Turbin angin yang disimulasikan menggunakan kecepatan angin 8 m/s yang merupakan kecepatan angin yang dipilih sebagai pembandingan dengan data turbin Savonius-Darrieus.

Data yang diperhatikan dari simulasi turbin Savonius dan turbin Darrieus adalah nilai C_p terhadap TSR. Nilai C_p yang didapat pada turbin Savonius adalah 0.2446 pada TSR 0.4687 sedangkan Nilai C_p yang didapatkan pada turbin Darrieus adalah 0,0178 pada TSR 0,0349. Nilai TSR yang lebih rendah dihasilkan oleh turbin Darrieus karena karakteristik turbin ini memiliki torsi awal yang rendah. Terlihat pula pada hasil *self-start* turbin Darrieus yang membutuhkan kecepatan angin yang cukup tinggi yaitu 4,15 m/s bila dibandingkan dengan *self-start* pada turbin Savonius yang hanya membutuhkan kecepatan angin 1.44 m/s. Nilai C_p yang turbin Savonius yang lebih tinggi daripada turbin Darrieus juga

disebabkan karena karakteristik turbin Savonius yang baik pada kecepatan angin rendah sedangkan turbin Darrieus membutuhkan kecepatan angin yang tinggi untuk menghasilkan performansi yang maksimal.

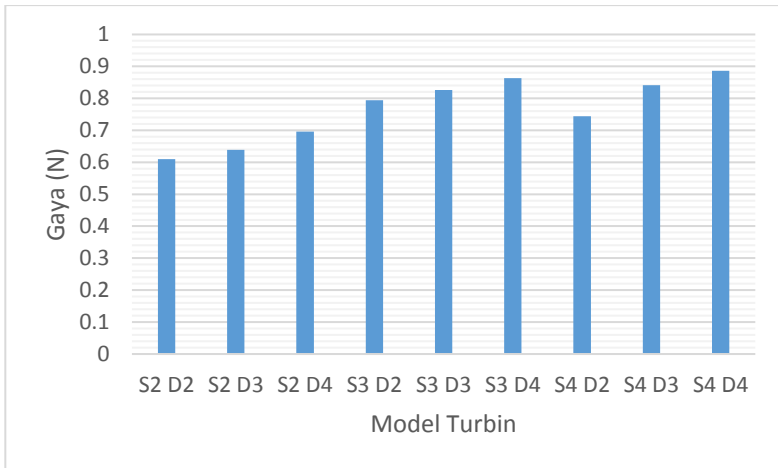
4.2.2 Data Resultan Gaya dan Torsi Turbin Savonius-Darrieus

Data resultan gaya dan torsi diambil dari simulasi dengan kondisi *steady* pada 12 sudut azimuth setiap 30 derajat sehingga didapatkan nilai satu putaran penuh. Seluruh data tersebut diresultan hingga menghasilkan data turbin secara keseluruhan pada setiap model dan dapat dibandingkan nilainya. Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan grafik perbandingan gaya dan torsi pada masing – masing model turbin dengan kecepatan angin 8 m/s dan didapatkan perbandingan diantara jenis turbin tersebut.

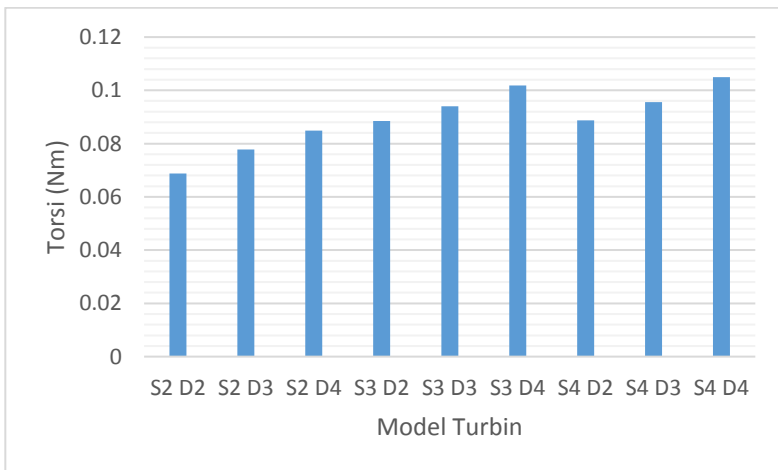
Gaya dan torsi ini berpengaruh pada nilai *self-start* dari turbin yang menunjukkan pada kecepatan angin berapa turbin mulai berputar. Turbin Savonius berperan penting terhadap nilai ini dengan cara menurunkan nilai *self-start* pada turbin karena turbin Darrieus saja tidak memiliki nilai *self-start* yang rendah. Data *self-start* pada setiap jenis turbin dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil self-start turbin Savonius-Darrieus

Turbin	Kecepatan Angin (m/s)
Darrieus 2, Savonius 2	1,89
Darrieus 2, Savonius 3	1,52
Darrieus 2, Savonius 4	2,08
Darrieus 3, Savonius 2	2,12
Darrieus 3, Savonius 3	1,8
Darrieus 3, Savonius 4	1,75
Darrieus 4, Savonius 2	1,92
Darrieus 4, Savonius 3	1,87
Darrieus 4 Savonius 4	2,33



Gambar 4.1 Perbandingan resultan gaya dengan model turbin



Gambar 4.2 Perbandingan resultan torsi dengan model turbin

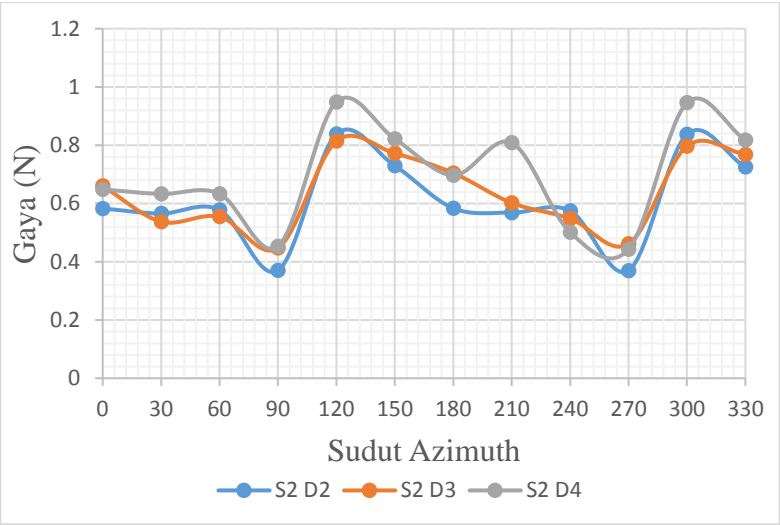
Pada nilai *self-start* kesembilan jenis turbin diatas didapatkan bahwa nilai *self-start* dari turbin Savonius 3 Darrieus 2 merupakan yang paling baik karena nilainya yang paling rendah yaitu 1,52 m/s. Sedangkan nilai *self-start* tertinggi dihasilkan dari turbin Savonius 4 Darrieus 4. Dari data ini dapat dijelaskan bahwa

jumlah sudu Savonius 3 paling efektif menurunkan nilai *self-start* dan jumlah sudu Darrieus yang semakin sedikit juga membantu menghasilkan nilai *self-start* yang rendah. Pada saat jumlah sudu Darrieus 4, nilai *self-start* selalu meninggi karena mengurangi torsi awal yang dihasilkan turbin secara keseluruhan.

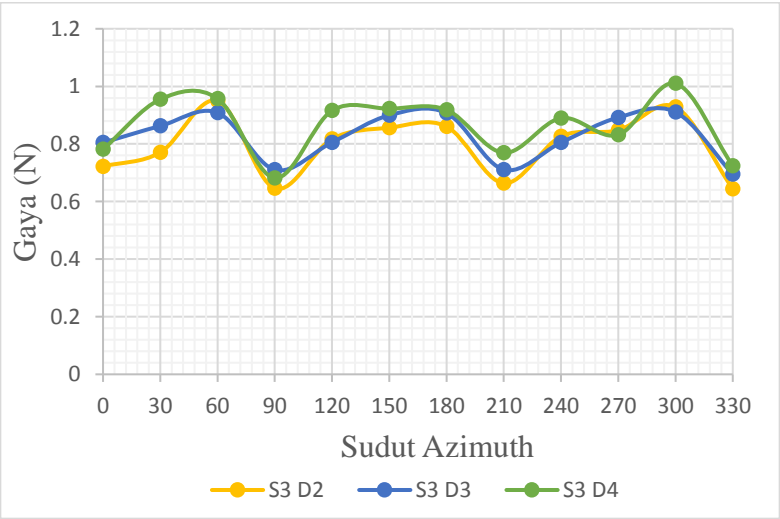
Data gaya dan torsi pada diagram batang diatas dapat dilihat bahwa nilai dari model turbin dengan jumlah sudu Savonius 4 dan Darrieus 4 memiliki nilai tertinggi. Nilai gaya pada model turbin tersebut yaitu 0.8865 N dan nilai torsi yaitu 0.1049 Nm. Dari bentuk grafik yang terlihat bahwa masing – masing turbin dan jumlahnya menunjang bertambahnya nilai gaya dan torsi pada turbin. Terdapat perbedaan hasil pada model turbin Savonius 4 dan Darrieus 2 yang memiliki nilai gaya dan torsi lebih rendah dari Savonius 3 dan Darrieus 3 yang memiliki jumlah sudu yang sama. Ini dikarenakan turbin Darrieus yang berperan untuk menaikkan gaya dan torsi hanya berjumlah 2.

Dari data *self-start*, gaya, serta torsi tidak menunjukkan relevansi yang cukup signifikan. Hal ini diakibatkan karena *self-start* hanya mempengaruhi kapan turbin tersebut mulai berputar, bukan seberapa besar resultan gaya dan torsi saat sudah berputar secara *steady*. Hal ini dibuktikan dengan nilai *self-start* tertinggi dan nilai gaya dan torsi tertinggi dihasilkan oleh turbin yang sama yaitu pada turbin Savonius 4 Darrieus 4. Sedangkan pada turbin Savonius 3 Darrieus 2 yang memiliki nilai *self-start* terendah, memiliki nilai gaya dan torsi yang sedang.

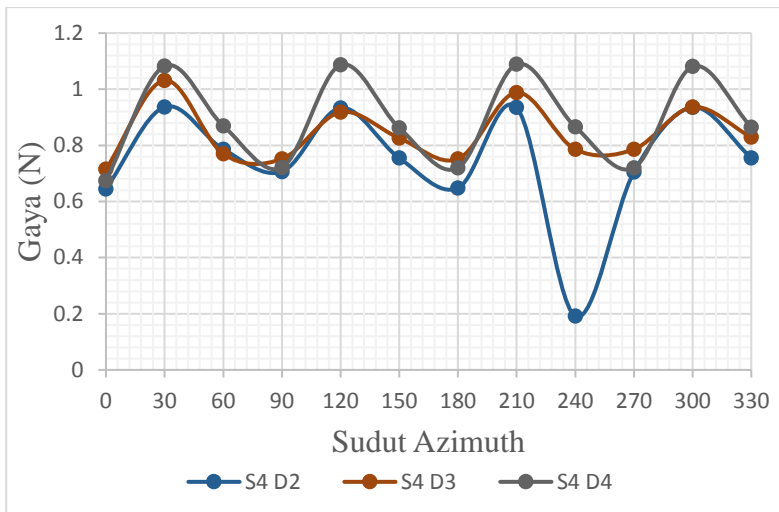
Data resultan gaya dan torsi diatas merupakan rata – rata dari data yang terdapat pada 12 sudut azimuth turbin. Setiap model turbin memiliki pola gaya dan turbin yang berbeda yang dapat menghasilkan resultan seperti yang ditunjukkan diatas. Pola yang dibuat pada turbin tersebut terlihat pada gambar dibawah ini. Gambar 4.3, 4.4, dan 4.4 merupakan pola gaya yang dihasilkan pada turbin dengan jumlah Savonius yang berbeda. Pada gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 merupakan pola torsi yang dihasilkan pada turbin dengan jumlah Savonius yang berbeda. Perbandingan antar Savonius ini dilakukan agar terlihat peran dari setiap jenis turbin.



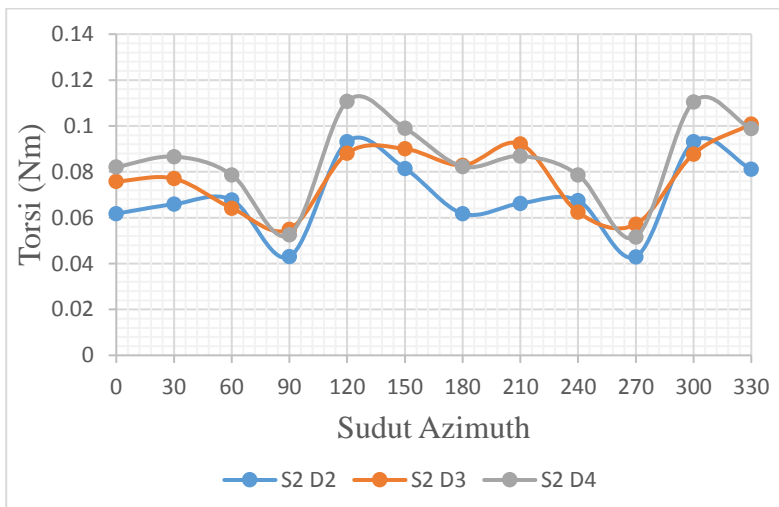
Gambar 4.3 Perbandingan gaya dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 2



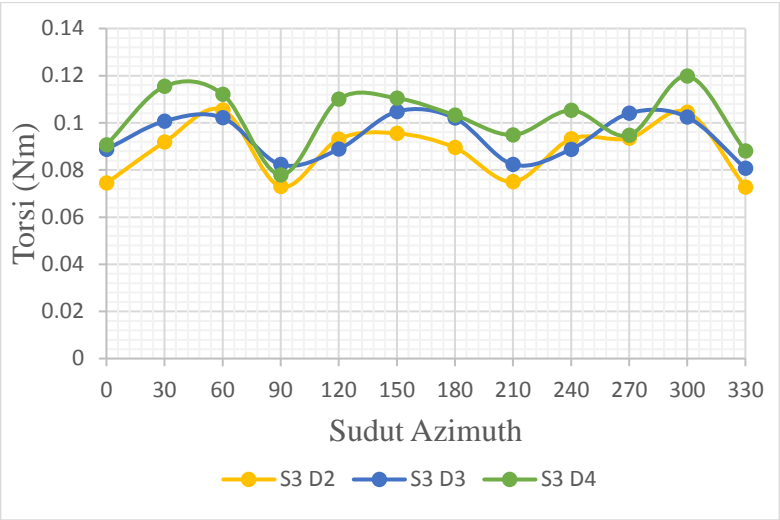
Gambar 4.4 Perbandingan gaya dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 3



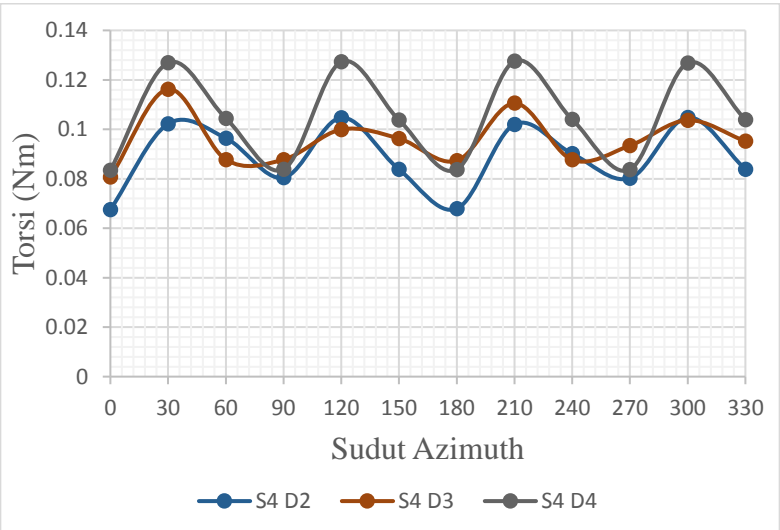
Gambar 4.5 Perbandingan gaya dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 4



Gambar 4.6 Perbandingan torsi dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 2



Gambar 4.7 Perbandingan torsi dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 3

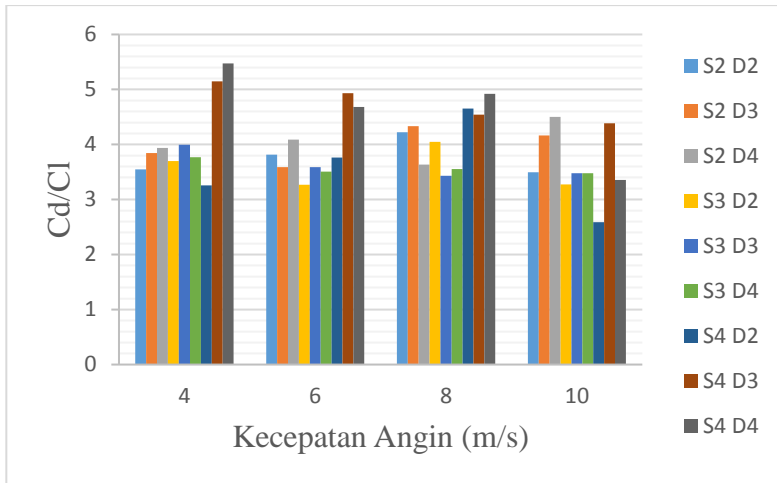


Gambar 4.8 Perbandingan torsi dengan sudut azimuth pada jumlah savonius 4

Grafik hanya menunjukkan pada kecepatan angin 8 m/s namun sudah cukup mewakili dari kecepatan angin yang lain yang memiliki pola yang serupa. Gaya tertinggi terdapat pada model Savonius 4 Darrieus 4 pada sudut azimuth 210 derajat dengan nilai 1.0888 N dan nilai torsi tertinggi terdapat pada variasi model dan sudut azimuth yang sama dengan nilai mencapai 0.1275 Nm. Sudut azimuth 210 derajat memiliki nilai yang tinggi hanya pada saat jumlah sudu Savonius 4. Sedangkan nilai gaya terendah terdapat pada turbin Savonius 4 Darrieus 2 pada sudut azimuth 240 derajat dengan nilai 0.1912 N dan nilai torsi terendah dihasilkan turbin Savonius 2 Darrieus 2 pada sudut azimuth 270 derajat dengan nilai 0.0429 Nm.

Pola yang dapat diperhatikan adalah hubungan antara jumlah sudu Savonius dengan jumlah puncak gaya dan torsi yang dihasilkan. Jumlah sudu Savonius selalu bernilai sama dengan jumlah puncak gaya dan torsi yang dihasilkan. Disisi lain, jumlah sudu Darrieus berpengaruh pada nilai puncak yang dihasilkan. Ini menjelaskan bahwa turbin Savonius mengatur pola gaya dan torsi sedangkan turbin Darrieus mengatur nilai gaya dan torsi yang dihasilkan. Peran dari setiap jenis turbin ini merupakan pengaruh dari dominasi salah satu Turbin untuk mengekstrak gaya dan torsi. Dominasi ekstrak gaya dan torsi terdapat pada turbin Savonius dengan kemampuannya mengatur puncak gaya dan torsi yang dihasilkan. Pada turbin Darrieus yang tidak terlalu mendominasi, hanya mnegubah nilai dari gaya dan torsi yang dihasilkan.

Data gaya yang dijelaskan diatas merupakan kombinasi dari gaya yang dihasilkan oleh turbin Savonius dan Darrieus yang memiliki cara kerja yang berbeda. Turbin Savonius menggunakan gaya *drag* sedangkan turbin Darrieus menggunakan gaya *lift* untuk memutar turbin. Perbandingan jumlah pengaruh dari masing – masing turbin dapat dijelaskan menggunakan koefisien *drag* dan koefisien *lift*. Kedua koefisien ini dapat dibandingkan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh masing – masing gaya pada kecepatan angin tertentu. Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan koefisien tersebut dengan kecepatan angin.



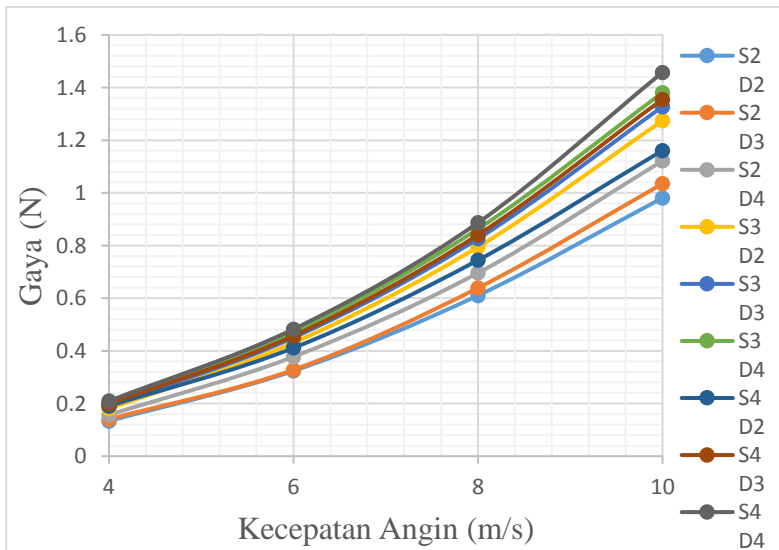
Gambar 4.9 Perbandingan C_d/C_l dengan kecepatan angin

Diagram diatas menunjukkan perbandingan gaya *drag* dan *lift* tertinggi ada pada model Savonius 4 dan Darrieus 4 di kecepatan angin 4 m/s dengan nilai mencapai 5,4750. Hal ini menunjukkan bahwa turbin Savonius memberikan selisih gaya terbanyak pada kecepatan angin rendah dimana turbin Darrieus tidak memberikan gaya yang maksimal. Perbandingan gaya yang lain cenderung fluktuatif pada model turbin yang lain dan pada kecepatan yang lain. Perbandingan gaya ini sangat dipengaruhi oleh luasan pada masing masing jenis turbin yang terkena angin

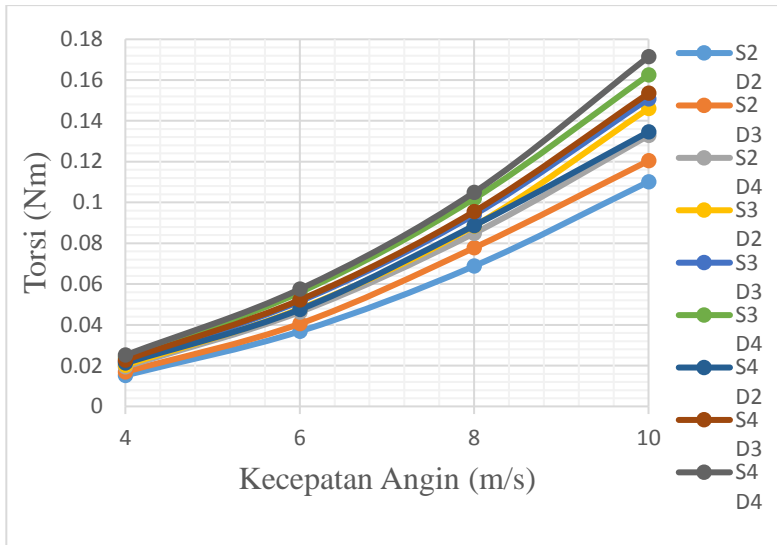
Hasil dari perbandingan ini juga dapat menjelaskan bahwa terdapat ketimpangan dimana didominasi gaya *drag*. Hal ini dapat menyebabkan terganggunya kinerja dari turbin Darrieus yang menggunakan gaya *lift*. Akibat yang mungkin terjadi apabila gangguan seperti ini terjadi adalah tidak berfungsinya secara maksimal salah satu jenis turbin dan hanya menghambat kinerja dari turbin yang lain. Ini dapat diminimalisir dengan menggunakan perbandingan kedua gaya secara proporsional agar masing – masing turbin dapat memberikan kelebihanannya untuk menutupi kekurangan dari turbin yang lainnya.

4.2.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Angin

Nilai gaya dan torsi dari turbin juga dipengaruhi dari kecepatan angin yang melaluinya. Maka dari itu kecepatan angin juga menjadi salah satu parameter yang menentukan performansi pada turbin. Pada penelitian ini terdapat empat variasi kecepatan angin pada simulasi yaitu 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, dan 10 m/s yang mewakili nilai *Reynolds Number* untuk turbin dengan skala yang lebih besar. Kecepatan angin ini dipilih untuk merepresentasikan kecepatan angin di Indonesia yang tergolong rendah hingga sedang. Kesesuaian turbin Savonius-Darrieus terhadap kecepatan angin rendah ditunjukkan pada grafik gaya dan torsi berbanding kecepatan angin. Variasi ini juga digunakan untuk menganalisis seberapa besar pengaruh dari kecepatan angin pada peningkatan gaya dan torsi turbin. Pengaruh kecepatan angin pada gaya dan torsi dapat dilihat pada gambar 4.10 dan 4.11.



Gambar 4.10 Pengaruh kecepatan angin pada gaya turbin



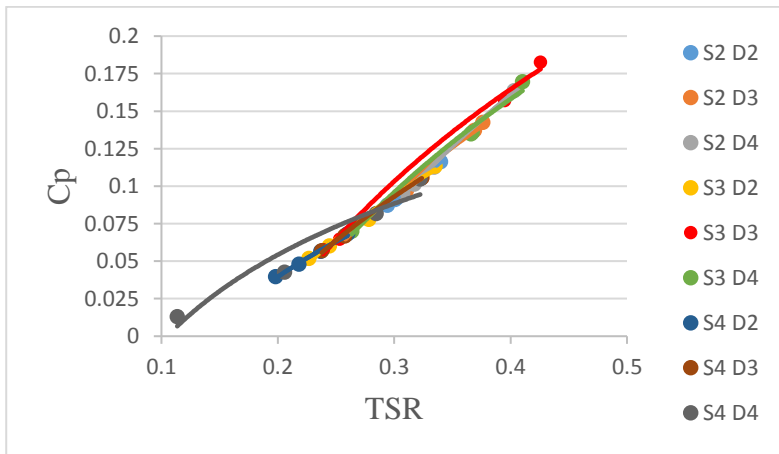
Gambar 4.11 Pengaruh kecepatan angin pada torsi turbin

Peningkatan yang terjadi pada gaya dan torsi memiliki pola yang tidak berbeda jauh. Peningkatan yang dihasilkan pada gaya dan torsi tertinggi yaitu dari kecepatan angin 4 m/s menuju 6 m/s dengan rata – rata kenaikan gaya sebesar 133,71% dan kenaikan torsi sebesar 133,85%. Pada kenaikan seterusnya memiliki rata – rata 85% dan 60%. Kenaikan tertinggi ini disebabkan oleh karakteristik turbin Savonius yang bekerja baik dikecepatan rendah. Kenaikan tertinggi dihasilkan oleh turbin Savonius 2 Darrieus 2 dengan kenaikan tertinggi 142,37%.

Nilai gaya dan torsi tertinggi memiliki urutan model turbin yang sama yaitu savonius 4 darrieus 4, Savonius 3 darrieus 4, dan Savonius 4 darrieus 3 dengan masing – masing nilai 1.457 N, 1.3805 N, dan 1.3556 N untuk gaya dan 0.1714 Nm, 0.1624 Nm, dan 0.1535 Nm. Urutan ini merupakan model yang memiliki jumlah sudu total paling banyak dibandingkan yang lain. Ini menunjukkan *solidity* dari suatu turbin sangat mempengaruhi pengekstrakan energi pada turbin.

4.2.3. C_p (Coefficient of Power)

C_p atau *Coefficient of Power* merupakan salah satu parameter penting yang digunakan untuk menunjukkan kemampuan dari suatu jenis turbin untuk mengekstraksi energi. Nilai C_p pada turbin beragam pada nilai TSR tertentu. Grafik perbandingan nilai C_p dari masing – masing model turbin dengan TSR menunjukkan model turbin dan posisi TSR terbaik yang dapat mengekstraksi energi. Grafik C_p – TSR ditunjukkan pada gambar 4.12 dibawah ini.



Gambar 4.12 Perbandingan C_p dengan TSR

Nilai C_p yang didapatkan setelah perhitungan sangat beragam dari setiap modelnya. C_p tertinggi dihasilkan turbin Savonius 3 Darrieus 3 pada TSR 0.4257 dengan nilai C_p yaitu 0.1825. Sedangkan nilai C_p terendah dihasilkan turbin Savonius 4 Darrieus 4 pada TSR 0.1135 dengan nilai C_p 0.0129. Nilai TSR juga dapat diperhatikan untuk mengetahui luas dari kecepatan angin yang dapat diekstrak oleh turbin. Turbin Savonius 3 Darrieus 3 memiliki nilai TSR terbesar yaitu mencapai 0.4257 dan memiliki C_p 0.1825 yang sekaligus nilai C_p tertinggi. Sebagian besar turbin yang disimulasikan memiliki grafik naik seiring dengan meningkatnya nilai TSR. C_p masih mungkin naik seiring dengan naiknya nilai TSR.

4.3 Karakteristik Aliran pada Turbin Savonius-Darrieus

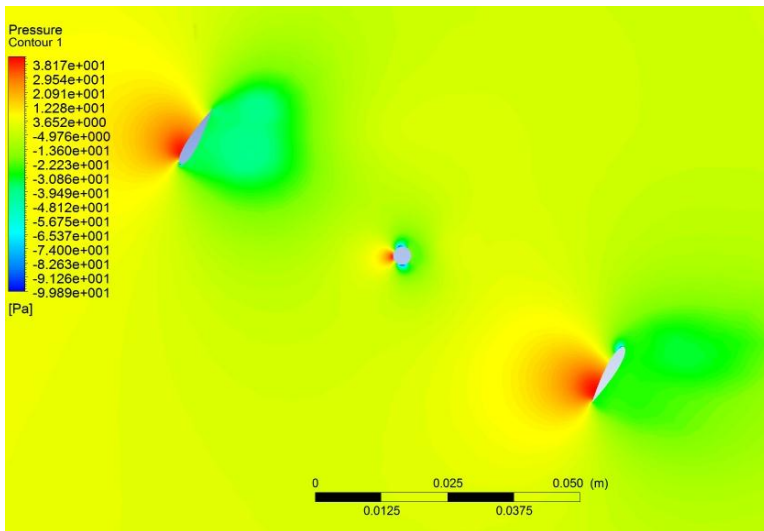
Karakteristik aliran yang melewati turbin meliputi beberapa parameter seperti kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran. Parameter – parameter ini cukup sulit untuk dianalisa menggunakan eksperimen secara langsung. Penelitian yang berbasis simulasi memiliki kelebihan untuk dapat menampilkan karakteristik agar diketahui penyebab gaya yang dihasilkan sudu turbin. Karakteristik aliran yang didapatkan digunakan untuk mengetahui faktor – faktor yang mempengaruhi performansi turbin.

Karakteristik aliran ditampilkan pada kedua jenis turbin agar dapat mengetahui pengaruh masing – masing dari jenis tersebut. Visualisasi karakteristik aliran ditampilkan dari atas turbin agar terlihat dengan jelas *wake* yang berada dibelakang turbin. Visualisasi pada karakteristik aliran dapat memberikan beberapa informasi penting terkait turbin tersebut.

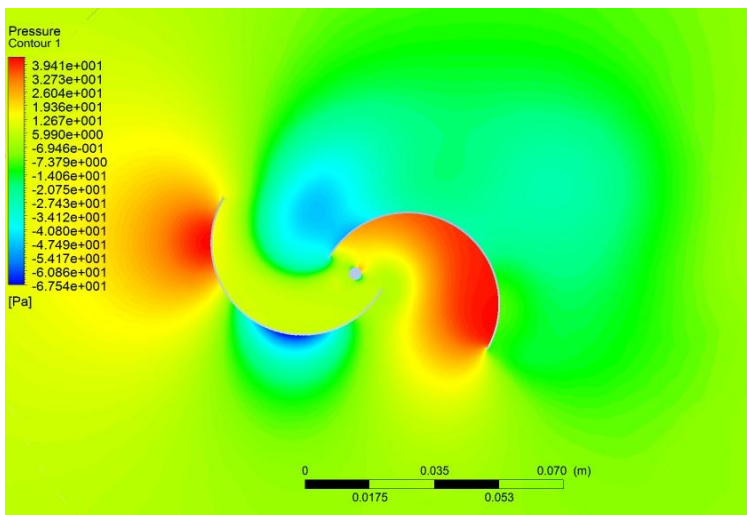
4.3.1 Karakteristik Kontur Tekanan Aliran

Karakteristik tekanan yang dihasilkan oleh turbin dapat menjelaskan penyebab dari turbin berputar dan menghasilkan suatu nilai gaya. Karakteristik tekanan yang diperhatikan yaitu pada turbin Savonius 2 Darrieus 2, Savonius 3 Darrieus 3, dan Savonius 4 Darrieus 4. Ketiga turbin ini diperhatikan pada kecepatan angin 8 m/s. Turbin diposisikan pada sudut azimuth 60 derajat dimana pada sudut ini posisi sebagian besar sudu memiliki nilai gaya dan torsi yang tinggi.

Kontur tekanan diperhatikan pada perbedaan tekanan yang berada disekitar sudu. Perbedaan tekanan ini dapat menjelaskan seberapa efektif suatu sudu dengan jumlah dan konfigurasi tertentu. Pada penelitian ini dapat terlihat juga perbedaan antara turbin Darrieus dan turbin Savonius dalam mengekstrak energi dari parameter tekanan. Selain itu juga dapat dilihat tekanan *downstream* turbin pada berbagai model turbin. Kontur tekanan pada turbin Savonius-Darrieus dapat dilihat pada gambar 4.13 sampai dengan 4.18 dibawah ini.



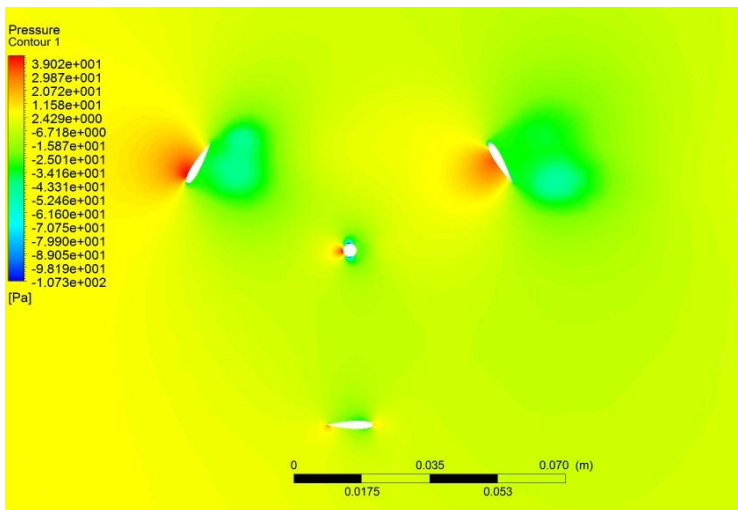
Gambar 4.13 Kontur tekanan aliran pada S2 D2 pada Darrieus



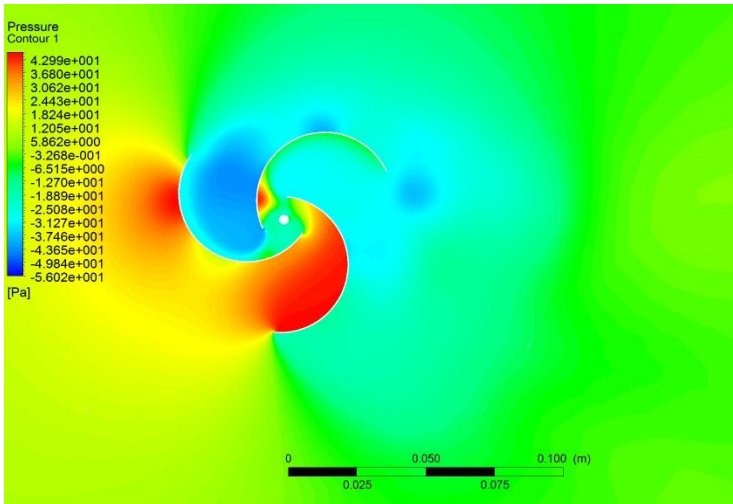
Gambar 4.14 Kontur tekanan aliran pada S2 D2 pada Savonius

Pada turbin Savonius 2 Darrieus 2 dapat terlihat perbedaan kontur tekanan pada masing-masing turbin. Pada turbin Darrieus tekanan *upstream* sudu mencapai nilai 38 Pa dan *downstream* -20 Pa. Nilai tekanan tersebut hanya terdapat pada salah satu sudu, sedangkan sudu lainnya tidak memiliki perbedaan tekanan yang sama karena berada pada posisi yang berbeda. Pada turbin Savonius perbedaan tekanan yang tercipta lebih besar daripada turbin Darrieus dengan tekanan *upstream* mencapai 40 Pa dan tekanan *downstream* hingga -45 Pa.

Perbedaan tekanan ini juga mempengaruhi tekanan disekitar turbin yang disebut *wake*. *Wake* yang dihasilkan pada turbin Darrieus mengekor kebelakang sepanjang 3 cm dan pada turbin Savonius sepanjang 10 cm. Pada turbin Darrieus panjang *wake* pada sudu depan tidak mempengaruhi sudu dibelakangnya karena tidak cukup panjang. Namun pada turbin Savonius, *wake* pada masing – masing sudu saling mempengaruhi sudu lainnya sehingga terdapat perubahan tekanan diantara kedua sudu yang mempengaruhi gaya pada turbin.



Gambar 4.15 Kontur tekanan aliran pada S3 D3 pada Darrieus

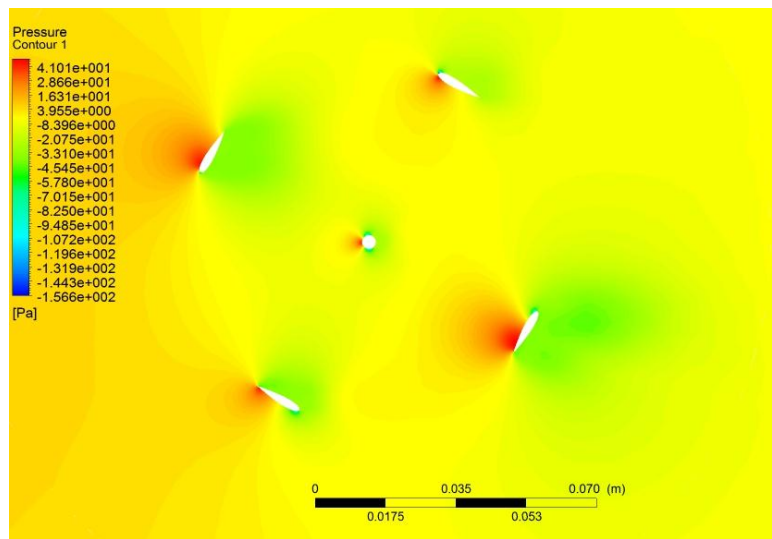


Gambar 4.16 Kontur tekanan aliran pada S3 D3 pada Savonius

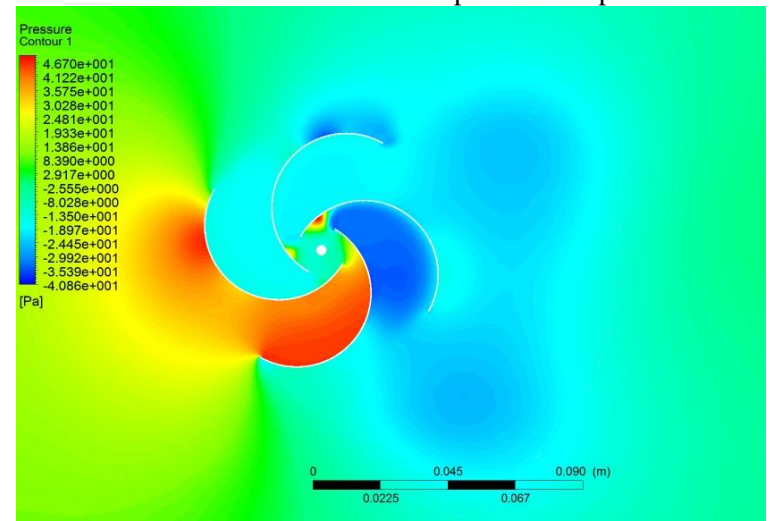
Pada jumlah sudu Savonius 3 Darrieus 3 memiliki kontur yang berbeda pada beberapa bagian. Tekanan pada turbin Darrieus yaitu 39 Pa pada *upstream* dan -43 Pa pada *downstream*. Pada turbin Savonius tekanan *upstream* mencapai 42 Pa dan tekanan *downstream* -31 Pa. Perbedaan tekanan pada turbin darrieus meningkat sedangkan pada turbin savonius menurun. Ini adalah pengaruh dari jumlah sudu yang terpasang. Dari gambar 4.17 pun terlihat bahwa hanya satu sudu dari Savonius yang benar – benar berfungsi maksimal karena pada posisi yang baik untuk mengekstrak energi. Begitu pula pada turbin Darrieus pada sudu yang terletak di bawah tidak menghasilkan gaya dan torsi yang baik karena pada sudut azimuth 180 derajat dimana gaya lift yang akan sangat kecil.

Dari sisi *wake* yang dihasilkan, turbin ini menghasilkan *wake* yang lebih panjang dan lebar pada turbin Savonius namun semakin mengecil pada turbin Darrieus. Panjang *wake* mencapai 2,5 cm pada Darrieus dan 12,5 cm pada Savonius. Kenaikan *wake* pada turbin Savonius dan penurunan pada turbin Darrieus ini disebabkan karena meningkatnya *solidity* dari turbin. Perubahan tekanan

diantara sudu Savonius pun terpengaruh oleh posisi dari ketiga sudu turbin tersebut.



Gambar 4.17 Kontur tekanan aliran pada S4 D4 pada Darrieus



Gambar 4.18 Kontur tekanan aliran pada S4 D4 pada Savonius

Kontur tekanan aliran pada turbin Savonius 4 Darrieus 4 tidak memberikan hasil yang banyak berbeda dengan yang sebelumnya. Pada perbedaan tekanan, nilai yang dihasilkan hampir sama dengan model turbin sebelumnya dengan nilai *upstream* 41 Pa dan *downstream* -33 Pa pada turbin Darrieus. Pada turbin Savonius nilai perbedaan tekanan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan 2 model turbin sebelumnya dengan nilai *upstream* mencapai 49 Pa dan -29 Pa pada *downstream*. Dari data ini dapat terlihat bahwa nilai perbedaan tekanan pada Savonius terus menurun dengan bertambahnya jumlah sudu.

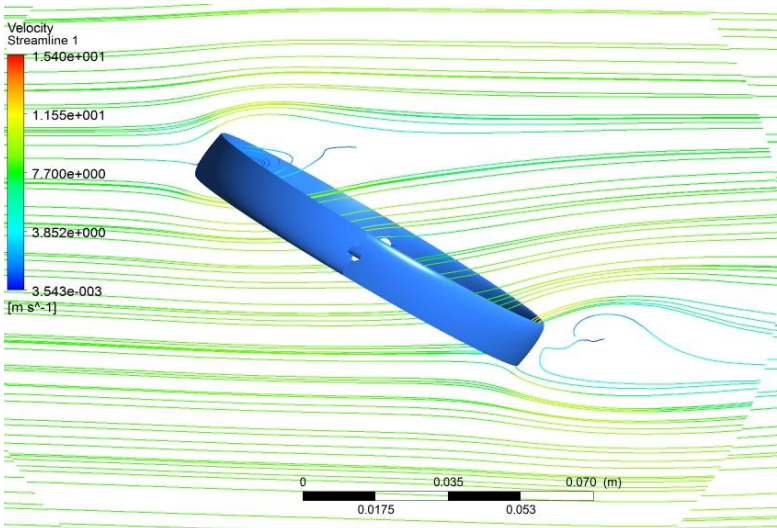
Dari sisi *wake*, pola yang ditunjukkan adalah semakin mengecilnya *wake* pada turbin Darrieus sedangkan semakin melebar pada turbin Savonius. Hal ini terlihat pada panjang *wake* turbin Darrieus yang berkurang hingga 2 cm dan turbin Savonius yang bertambah menjadi 20 cm. *Wake* yang dihasilkan oleh turbin Savonius bukan hanya semakin panjang namun juga semakin melebar. *Wake* pada setiap sudu akan saling bertabrakan dan membuat area *wake* meluas. Hal ini dapat merugikan apabila didaerah *wake* tersebut terdapat turbin angin lain karena akan mengurangi tekanan yang dapat diekstrak turbin.

4.3.2. Karakteristik Pola Kecepatan Aliran

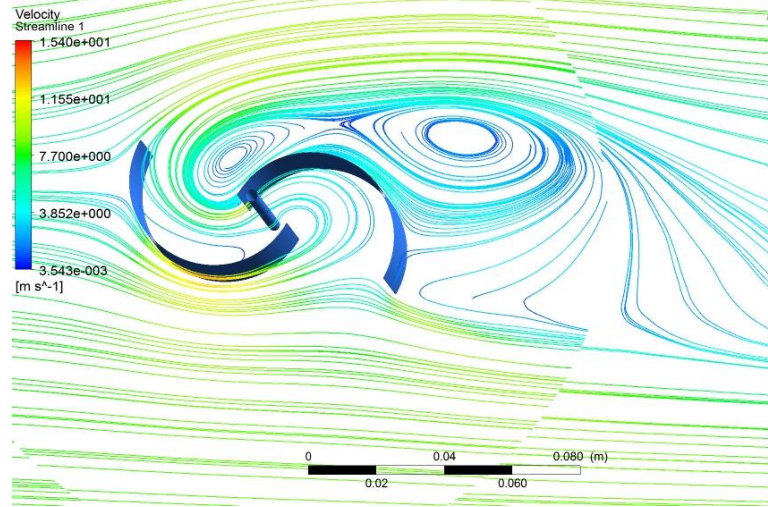
Pola kecepatan aliran digunakan sebagai alat untuk menganalisis arah aliran dan *wake* yang berada disekitar turbin. *Wake* akan terlihat sebagai turbulensi aliran dan memungkinkan membentuk *vortex* dimana aliran udara akan membentuk sebuah pusaran. Pola kecepatan aliran juga dapat menunjukkan bagaimana angin yang menabrak turbin berubah kecepatannya pada arah tertentu dan menggerakkan turbin. Perubahan arah dan kecepatan ini dapat mempengaruhi kinerja dari turbin.

Wake aliran udara yang dilihat dari nilai kecepatan yang terbentuk dibelakang turbin dapat sangat bervariasi namun masih saling terkait dengan *wake* yang dilihat dari parameter tekanan. Kedua parameter ini menunjukkan hubungan yang sebanding dimana tekanan yang rendah juga memiliki kecepatan angin yang

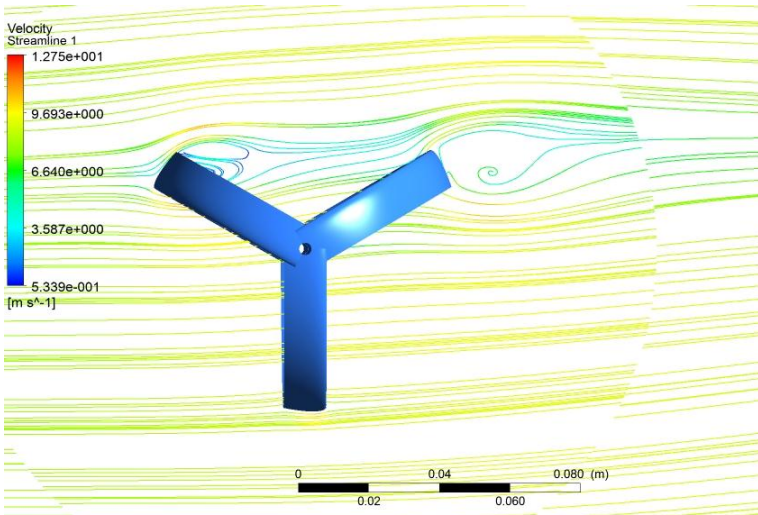
rendah seperti yang terlihat pada pola aliran kecepatan pada gambar dibawah.



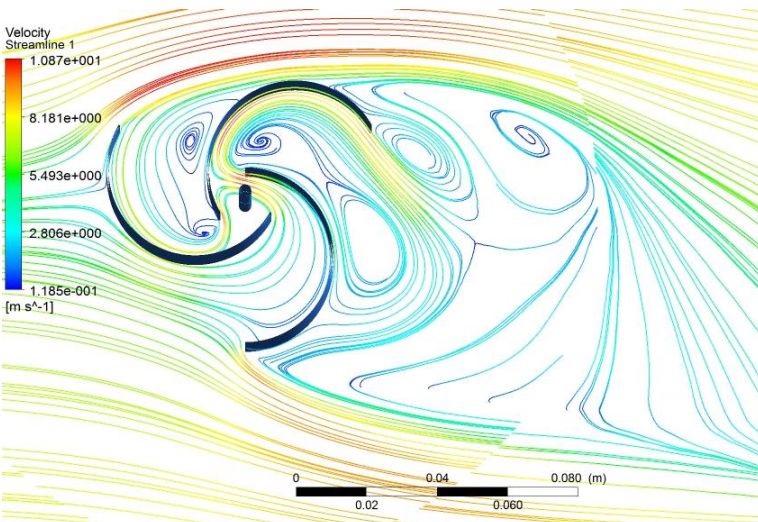
Gambar 4.19 Pola Kecepatan aliran pada S2 D2 pada Darrieus



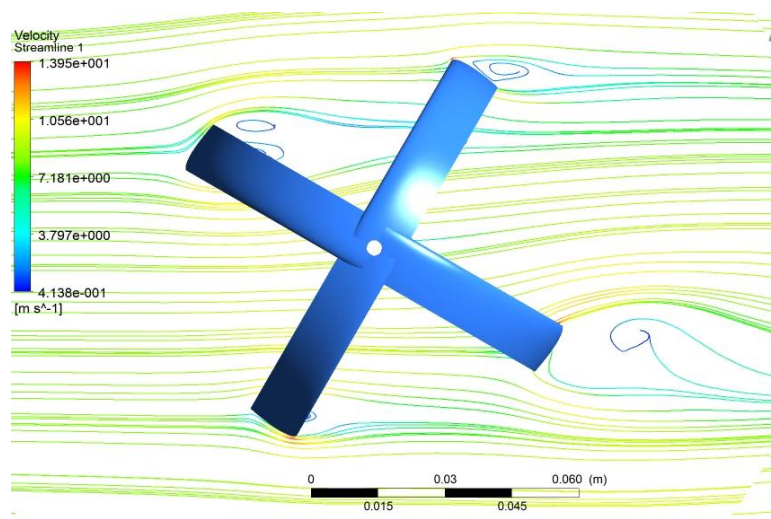
Gambar 4.20 Pola Kecepatan aliran pada S2 D2 pada Savonius



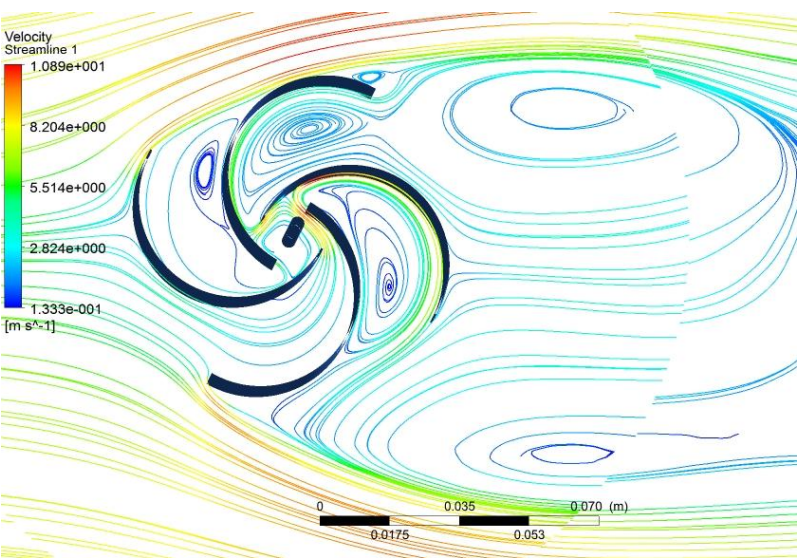
Gambar 4.21 Pola Kecepatan aliran pada S3 D3 pada Darrieus



Gambar 4.22 Pola Kecepatan aliran pada S3 D3 pada Savonius



Gambar 4.23 Pola Kecepatan aliran pada S4 D4 pada Darrieus



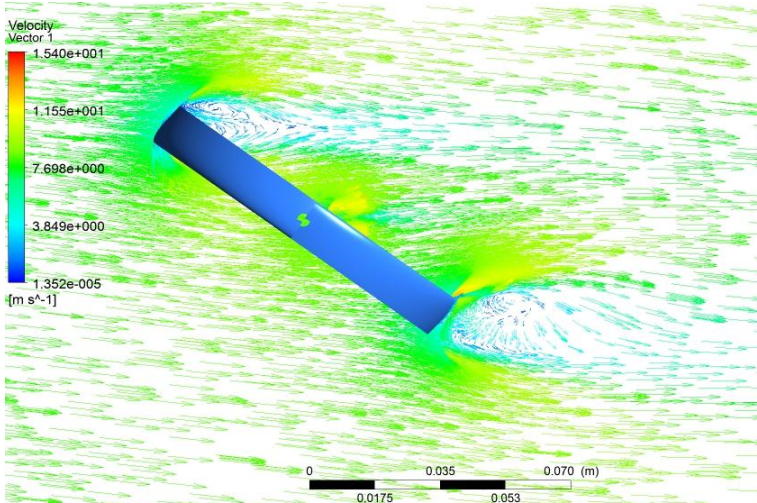
Gambar 4.24 Pola Kecepatan aliran pada S4 D4 pada Savonius

Pola kecepatan aliran yang terbentuk dari ketiga model turbin ini berbeda – beda dipengaruhi oleh jumlah sudu yang digunakan. Pada turbin Darrieus, kecepatan angin tertinggi mencapai 12 m/s pada bagian atas sudu. Sedangkan pada bagian bawah sudu kecepatannya rendah pada kisaran 3 m/s. Perbedaan kecepatan ini terjadi pada setiap sudu dari Darrieus kecuali pada jumlah sudu 3. Pada jumlah sudu 3 terdapat dua sudu yang sejajar sehingga sudu yang dibelakang tidak mendapatkan kecepatan angin yang maksimal karena telah berkurang kecepatannya setelah melewati sudu yang pertama. Pada turbin Savonius, kecepatan disisi sudu hanya meningkat hingga 10 m/s dan terjadi penurunan hingga 2 m/s didalam turbin. Namun, *overlap* yang dimiliki turbin Savonius memberikan ruang untuk aliran mengalir dan memberikan pengaruh pada sudu yang lain. Terdapat peningkatan kecepatan saat aliran melewati ujung sudu yang terbuka sehingga beberapa sudu yang lain mendapatkan sedikit kenaikan kecepatan untuk menggerakkan turbin tersebut. Kenaikan kecepatan ini merata di sisi dalam sudu Savonius.

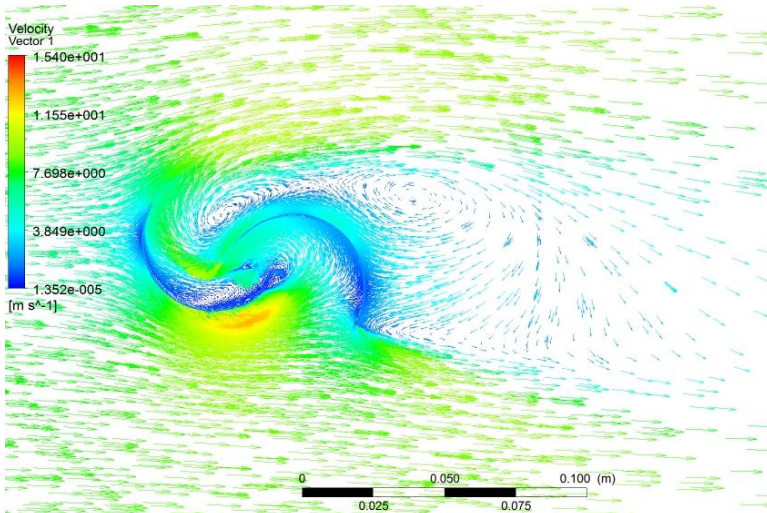
Wake yang dihasilkan pada turbin Darrieus dan Savonius memiliki ukuran yang sangat berbeda. Turbin Darrieus menghasilkan *wake* terpanjang hingga 7 cm pada setiap modelnya. Berbeda jauh dengan turbin Savonius yang *wake* terpanjangnya mencapai 20 cm pada jumlah sudu 4. Pada turbin Darrieus, pusaran angin terbentuk kecil disetiap bagian belakang dari sudu. Sedangkan pada turbin Savonius, pada jumlah sudu 2 terdapat 1 pusaran dibelakang dan satu diantara sudu. Pada jumlah sudu 3, terdapat 3 pusaran didalam sudu dan 2 pada belakang sudu diposisi yang sama. Pada jumlah sudu 4, Pusaran yang dihasilkan sebanyak 3 pusaran didalam sudu dan 2 pusaran besar dibelakang sudu. Semakin banyak jumlah sudu pada Savonius semakin luas *wake* yang terbentuk sama seperti halnya pada kontur tekanan. Pusaran angin yang berada didalam turbin Savonius akan membantu memeberikan gaya pada setiap sudu yang ada, namun apabila pusaran terlalu besar, akan menimbulkan getaran pada turbin yang dapat mengganggu kinerja turbin.

4.3.3 Karakteristik Vektor Kecepatan Aliran

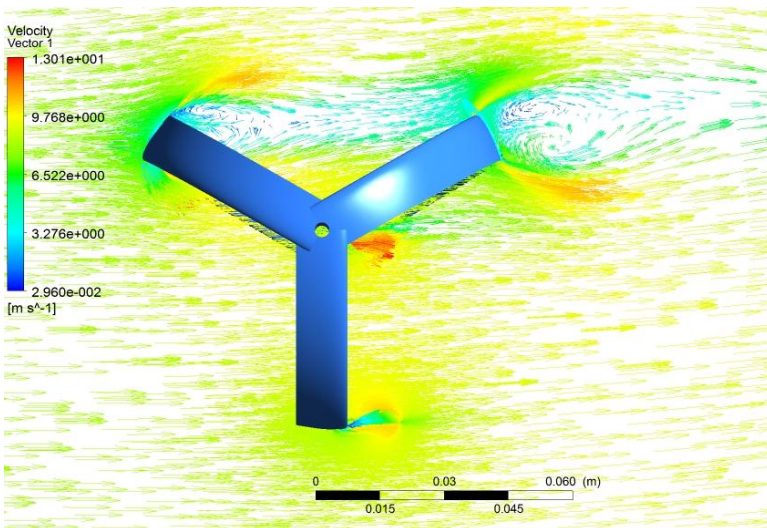
Parameter lainnya yang dapat dianalisis adalah vektor kecepatan aliran. Berbeda dengan pola kecepatan aliran, vektor kecepatan menunjukkan arah pada setiap titik dari aliran yang berada didalam dan dibelakang turbin. Vektor kecepatan aliran akan menunjukkan arah dan nilai kecepatan dari aliran yang mengenai turbin. Dari data ini dapat diketahui distribusi kecepatan aliran pada setiap sudu dan pengaruhnya bagi performansi dari turbin. Apabila distribusi dan kecepatan aliran tidak merata maka akan mengurangi ekstraksi energi yang dapat dilakukan oleh turbin. Jumlah dan konfigurasi sudu akan mempengaruhi distribusi kecepatan yang melewati salah satu sudu dan memberi efek pada sudu yang lainnya. Hal ini akan berguna untuk mengetahui jumlah dan konfigurasi yang tepat pada suatu jenis turbin. Gambar 4.25 sampai dengan gambar 4.30 menunjukkan vektor kecepatan aliran pada tiga model dan jenis turbin sama seperti pada kontur tekanan dan pola kecepatan aliran sebekumnya.



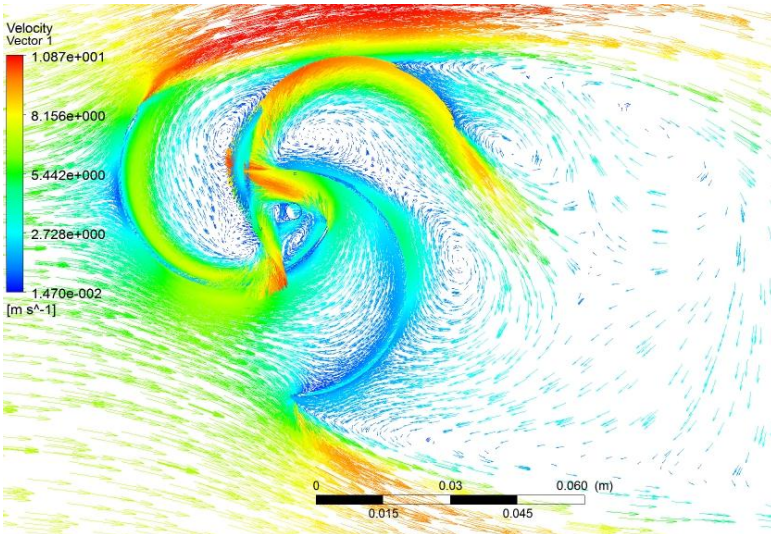
Gambar 4.25 Vektor kecepatan aliran pada S2 D2 pada Darrieus



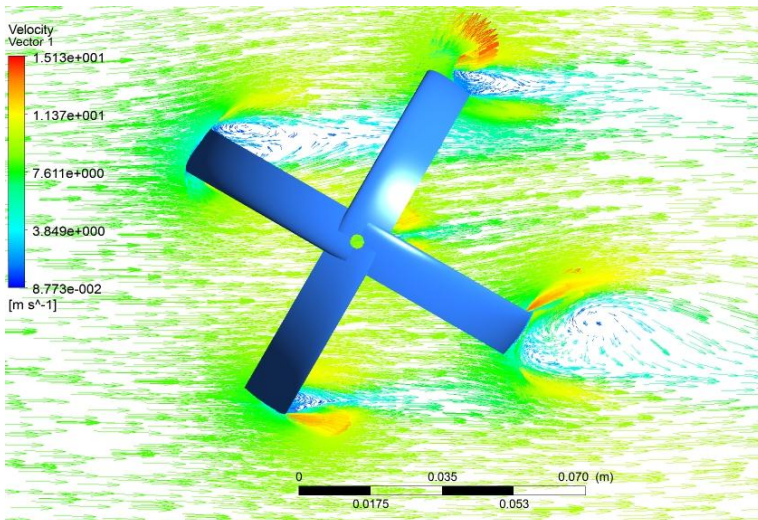
Gambar 4.26 Vektor kecepatan aliran pada S2 D2 pada Savonius



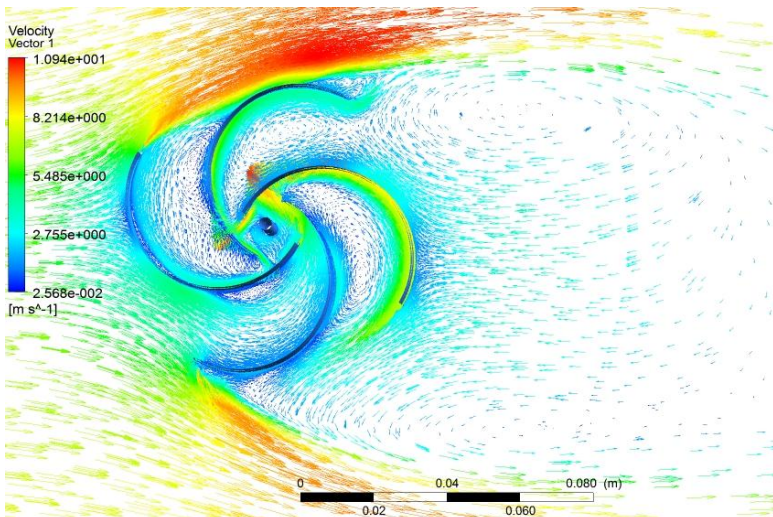
Gambar 4.27 Vektor kecepatan aliran pada S3 D3 pada Darrieus



Gambar 4.28 Vektor kecepatan aliran pada S3 D3 pada Savonius



Gambar 4.29 Vektor kecepatan aliran pada S4 D4 pada Darrieus



Gambar 4.30 Vektor kecepatan aliran pada S4 D4 pada Savonius

Pada gambar diatas dapat diambil data pada turbin Darrieus setiap sudu menerima kecepatan angin yang sama namun membentuk lapisan kecepatan yang berbeda di setiap sudunya. Pada turbin Darrieus dengan jumlah sudu 2, kecepatan yang terbentuk disekitar dan dibelakang turbin sebesar 3,5 m/s. Pada jumlah sudu 3, kecepatan yang diterima sudu berubah pada sudu di posisi kanan atas menjadi sebesar 4 m/s karena telah berkurang diekstraksi oleh sudu didepannya. Hal tersebut juga terjadi pada jumlah sudu 4 dimana dua sudu dibelakang menerima kecepatan angin hanya sebesar 6 m/s karena terkena sebagian oleh dua sudu didepannya. Pada turbin Savonius, kecepatan angin sudah berkurang menjadi 4,5 m/s sebelum bertabrakan dengan sudu paling depan karena bentuk turbin Savonius yang melebar sehingga saat turbin berputar memberikan angin dengan arah sebaliknya pada angin yang datang. Kecepatan angin kembali meninggi disamping turbin dan didalam turbin saat angin melewati ujung turbin dengan kecepatan mencapai 10 m/s. Pada sudu Savonius bagian dalam kecepatan angin juga meningkat menjadi 7

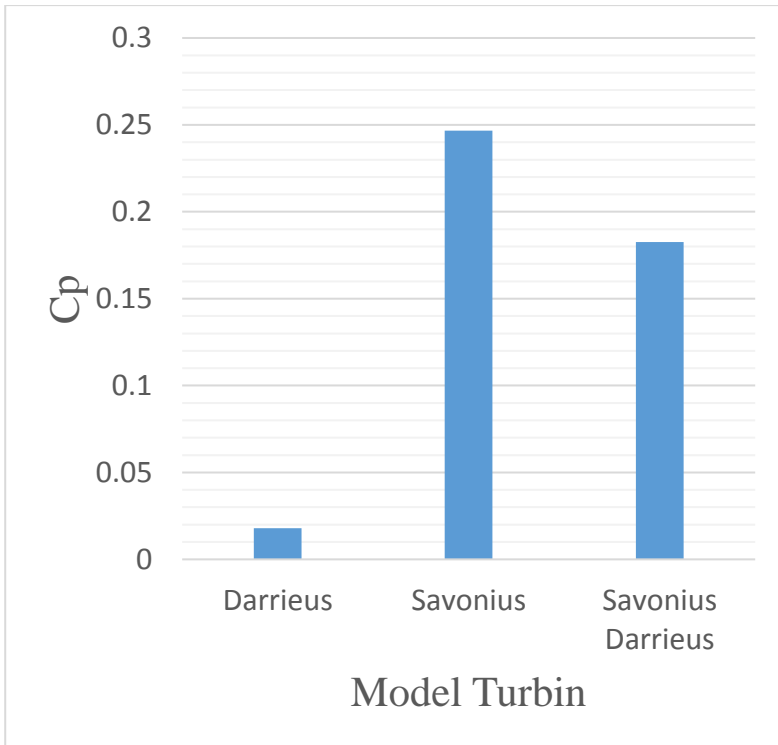
m/s. Kecepatan angin dibagian dalam Savonius menghasilkan kecepatan terbesar pada jumlah sudu 3. Kecepatan yang meningkat pada bagian dalam ini merupakan fungsi dari *overlap* sudu yang dibuat dan akan membantu memberikan gaya pada turbin.

4.4 Pembahasan

Vertical Axis Wind Turbine Savonius-Darrieus ini divariasikan dengan sembilan model dengan sudu dan konfigurasi yang berbeda untuk mencari kelebihan dan kekurangan yang dimiliki model – model tersebut. Performansi yang baik pada kecepatan rendah menjadi prioritas pemilihan kombinasi turbin angin Savonius dan Darrieus ini. Analisis performansi dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter yang telah diambil nilai pada berbagai kondisi. Selain sembilan model yang divariasikan, kecepatan angin juga mempengaruhi performansi turbin. Pembahasan sembilan model turbin Savonius-Darrieus akan dibandingkan dengan turbin Savonius dan turbin Darrieus untuk membandingkan mana yang lebih baik.

4.4.1 Analisis Perbandingan Turbin Savonius, Turbin Darrieus, dan Turbin Savonius-Darrieus

Turbin Savonius memiliki kelebihan dengan torsi awal yang baik yang dapat ditunjukkan dari nilai *self-start* yang rendah. Kelebihan lainnya adalah dapat mengekstraksi angin pada kecepatan angin rendah lebih maksimal dibandingkan turbin Darrieus. Sebaliknya, kekurangan turbin Savonius adalah nilai performansi maksimalnya yang lebih rendah daripada turbin Darrieus. Walau memiliki nilai performansi yang tinggi, turbin Darrieus memiliki torsi awal yang buruk yang terlihat dari nilai *self-start* yang tinggi bahkan membutuhkan pendorong awal. Kekurangan ini membuat turbin Darrieus sangat tidak cocok diaplikasikan pada kecepatan rendah karena akan menghasilkan nilai C_p dan TSR yang rendah. Turbin Savonius-Darrieus dibentuk untuk mengurangi kelemahan masing-masing dari jenis turbin dan baik pada kecepatan angin rendah.



Gambar 4.31 Perbandingan nilai C_p pada jenis turbin

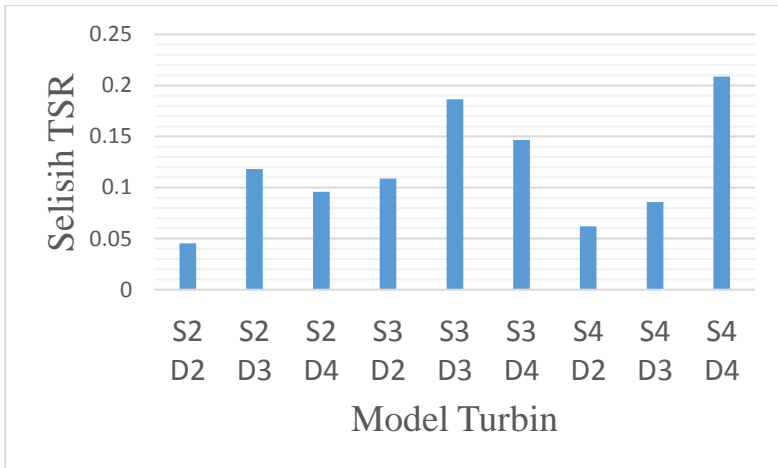
Grafik diatas merupakan nilai C_p turbin pada kecepatan 8 m/s dimana turbin Savonius-Darrieus yang digunakan merupakan yang menghasilkan nilai C_p terbaik. Pada turbin Savonius yang disimulasikan didapatkan hasil C_p yang cukup tinggi yaitu 0.2466 pada TSR 0,4687 Turbin Darrieus memiliki nilai C_p yaitu 0,0178 pada TSR 0,0349. Turbin Savonius-Darrieus memiliki nilai C_p terbaik pada model turbin Savonius 3 Darrieus 3 dengan nilai 0.1825 pada TSR 0.4257. Dari data diatas dapat dijelaskan secara C_p maka turbin Savonius merupakan turbin yang terbaik pada kecepatan rendah. Terlihat pula pada nilai TSR setiap turbin diatas. Nilai TSR dari turbin Savonius dan turbin Savonius-Darrieus jauh lebih tinggi dibandingkan turbin Darrieus, ini menunjukkan bahwa

pada kecepatan rendah kedua turbin ini dapat menghasilkan nilai torsi awal yang baik. Namun pada nilai C_p , turbin Savonius-Darrieus memiliki nilai yang lebih rendah, ini menunjukkan bahwa penambahan turbin Darrieus pada turbin Savonius mengurangi performansinya apabila berada pada kecepatan rendah. Penurunan yang terjadi cukup signifikan dengan selisih mencapai 0.0641 pada TSR yang tidak berbeda jauh. Dari data diatas maka penggabungan turbin Savonius-Darrieus tidak menghasilkan nilai C_p yang lebih baik daripada turbin Savonius pada kecepatan rendah yang disimulasikan.

Pada parameter *self-start*, turbin Savonius membutuhkan kecepatan angin sebesar 1,44 m/s untuk berputar. Turbin Darrieus membutuhkan kecepatan 4,15. Turbin Savonius-Darrieus yang memiliki nilai *self-start* terbaik yaitu pada turbin Savonius 3 Darrieus 2 dengan kecepatan angin 1,52 m/s. Secara *self-start*, penggabungan turbin Savonius-Darrieus berhasil menurunkan nilai *self-start* dari turbin Darrieus hingga 2,63 m/s. Hal ini menunjukkan pada kecepatan rendah, turbin Savonius-Darrieus lebih baik digunakan daripada turbin Darrieus.

4.4.2 Analisis Turbin Savonius-Darrieus Terbaik

Turbin Savonius-Darrieus menghasilkan berbagai nilai C_p pada berbagai nilai TSR. Nilai C_p tertinggi pada model turbin Savonius 3 Darrieus 3 dengan nilai 0.1825 pada TSR 0.4257. Turbin Savonius 3 Darrieus 3 memiliki nilai TSR terbesar yaitu mencapai 0.4257. Setiap model memiliki *range* TSR yang beragam dari simulasi dengan kecepatan angin 4 hingga 10 m/s. Panjang *range* TSR ini dapat menunjukkan nilai regresi dari C_p turbin apabila nilai TSR nya tetap dinaikan. Hal ini berguna untuk memprediksi nilai C_p yang akan dihasilkan turbin dengan kecepatan angin yang lebih tinggi dari yang disimulasikan. Grafik dibawah ini menunjukkan selisih TSR yang dihasilkan dengan kecepatan 4 m/s hingga 10 m/s.



Gambar 4.32 Selisih hasil TSR pada simulasi kecepatan angin 4 – 10 m/s

Gambar 4.32 menunjukkan *range* TSR yang tertinggi yaitu pada turbin Savonius 4 Darrieus 4 dimana nilai C_p yang dihasilkan antara 0.38 hingga 1.19. Sedangkan *range* TSR terendah pada turbin Savonius 2 Darrieus 2 dengan nilai C_p antara 0.66 hingga 0.77. Dari sembilan model turbin, turbin Savonius 3 Darrieus 3 menunjukkan *trendline* peningkatan C_p terbesar terhadap TSR. Hal ini memungkinkan turbin ini memiliki nilai C_p yang semakin baik apabila nilai TSR semakin tinggi. Dari data dan pembahasan diatas turbin Savonius 3 Darrieus 3 merupakan turbin terbaik.

Self-start terendah dari sembilan model turbin ada pada turbin Savonius 3 Darrieus 2 dengan 1,52 m/s dan tertinggi pada turbin Savonius 4 Darrieus 4. Data ini sebanding dengan nilai gaya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin. Pada turbin Savonius 3 dan Darrieus 3 yang memiliki nilai C_p tertinggi, dengan nilai *self-start* adalah 1,8 m/s dan nilai gaya serta torsi yang dihasilkan merupakan nilai kedua terbesar dari sembilan model yang ada. Ini menunjukkan bahwa turbin Savonius 3 Darrieus 3 masih berada ditingkatan yang paling baik walaupun *self-start* yang dibutuhkan lebih besar 0,36 m/s dibandingkan dengan turbin Savonius.

Dari karakteristik aliran yang dimiliki oleh turbin Savonius 3 Darrieus 3, 3 sudu Savonius memperlihatkan efektivitas dari aliran yang terlihat dari kecepatan aliran yang meningkat di bagian dalam sudu yang membantu terbentuknya gaya pada setiap sudunya. Pada jumlah sudu Darrieus 3 mendapatkan distribusi aliran yang maksimal daripada 2 dan 4 sudu sehingga tidak cukup memberatkan turbin yang memberikan nilai kecepatan putar yang maksimal. Kecepatan putar yang maksimal membuat nilai TSR yang dihasilkan cukup tinggi. TSR yang tinggi akan menyebabkan tingginya nilai C_p juga.

Maka dari semua data diatas, turbin Savonius 3 Darrieus 3 merupakan turbin dengan performansi terbaik yang bekerja pada kecepatan rendah yaitu antara 4 – 10 m/s pada simulasi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, analisis data, dan pembahasan yang telah dilakukan maka kesimpulan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Turbin Savonius 4 Darrieus 4 mendapatkan distribusi tekanan dan kecepatan angin total terbesar sehingga menghasilkan ekstraksi resultan gaya dan torsi terbesar dengan nilai masing - masing 0.8865 N dan 0.1049 Nm dibandingkan dengan turbin model lain.
- Turbin dengan jumlah sudu 3 dan 4 mendapatkan pusaran *wake* dengan tingkat turbulensi yang lebih besar dibandingkan dengan jumlah sudu 2. Pusaran *wake* yang terbentuk didalam turbin mempengaruhi ekstraksi energi disetiap sudu Savonius.
- Turbin Savonius-Darrieus tidak menghasilkan performansi lebih baik daripada turbin Savonius namun lebih baik daripada turbin Darrieus pada kecepatan angin 4 – 10 m/s.
- Turbin Savonius 3 Darrieus 3 memiliki performansi terbaik dengan nilai C_p mencapai 0.1825 pada TSR 0.4257. Nilai *self-start* 1,8 m/s serta nilai gaya dan torsi yang tinggi

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Kesesuaian ukuran turbin savonius dan Darrieus lebih diperhatikan dan dihitung secara matang agar efek yang diberikan tidak terlalu besar pada salah satu turbin.
- Desain Turbin Savonius-Darrieus bisa dikembangkan dengan konfigurasi yang lain dimana masing – masing turbin dapat memberikan keuntungan yang maksimal atas turbin yang lain.

Halaman ini memang dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson Jr, John D. 1984. *Fyndamentals Of Aerodynamics*. Maryland: McGraw-Hill Book Company
- Bartl, J. 2011. *Wake Measurement Behind an Array of Two Model Wind Turbines*. Master of Science Thesis, KTH Industrial Engineering and Management
- Coiro, D. P., Marco, D., Nicolosi, F., Melone, S., Montella, F. 2005. *Dynamic Behaviour of The Patented Kobold Tidal Current Turbine: Numerical and Experimental Aspects*. *Acta Polytechnica*, 45(3), 77-84.
- ESDM. 2014. *Potensi dan Peluang Investasi Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi*, Jakarta: Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi.
- Fox dan McDonalds. 2011. *Introduction To Fluids Mechanics*, Manhattan: John Wiley & Sons, Inc.
- Ghosh, A dkk. 2014. "Computational analysis of flow physics of a combined three bladed Darrieus Savonius wind rotor," *Energy*, vol. I, pp. 1-13,
- Gupta, R, dkk, 2008. "Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor," *Renewable Energy*, vol. I, no. 33, p. 1974–1981.
- GWEC, 2014. *Global Wind Energy Outlook 2014*, Global Wind Energy Council 2014.
- Lee, CF. 2016. *Investigation into the wake aerodynamics of a five-straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel test*. *Journal of Wind Engineering*, 155, 23-25
- Maldonado, R D dan Dkk. 2013. "Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico," *Energy*, vol. I, no. 57, p. 691 – 697.
- Munson, B. R., Young D. F., Okiishi T. H. 2002. *Fundamental of Fluids Mechanic* 2nd edition. Canada: John Wiley & son, Inc.
- Paraschivoiu, Ion. 2002. *Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept*, Canada: Polytechnic International Press.

- Pritchard, Philip J. 2011. Introduction to Fluid Mechanics. Manhattan: John Wiley & son, Inc.
- Vieira d R, Aldo, 2009. Fundamentals Of Renewable Energy Processes, London: Academic Press.
- Wenhubun, Frederikus. dkk. 2014. "An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades," *Energy*, vol. I, no. 68, p. 297 – 304,
- Zobaa, Ahmed F dan Bansal, Ramesh 2011. Handbook of Renewable Energy Technology. USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

LAMPIRAN I

1.1. Nilai torsi, gaya, dan C_p pada masing – masing variasi turbin

Kecepatan Angin 4 m/s								
Model	Torsi (Nm)	Gaya (N)	Lift (N)	Drag (N)	Kec. Sudut (Rad/s)	TSR	Ct	C_p
S2 D2	0.0152	0.1336	0.0216	-0.0766	30.2012	0.3398	0.3421	0.1162
S2 D3	0.0169	0.1402	0.0211	-0.0812	27.6251	0.3108	0.3129	0.0972
S2 D4	0.0194	0.1566	0.0224	-0.0883	27.3214	0.3074	0.3095	0.0951
S3 D2	0.0202	0.1803	0.0158	-0.0586	24.7243	0.2781	0.2800	0.0779
S3 D3	0.0220	0.1920	0.0036	-0.0644	22.4938	0.2531	0.2548	0.0645
S3 D4	0.0240	0.1995	0.0164	-0.0620	23.4258	0.2635	0.2653	0.0699
S4 D2	0.0212	0.1903	0.0020	-0.0413	17.6139	0.1982	0.1995	0.0395
S4 D3	0.0227	0.1984	0.0073	-0.0374	22.8917	0.2575	0.2593	0.0668
S4 D4	0.0251	0.2095	0.0069	-0.0379	10.0950	0.1136	0.1144	0.0130
Kecepatan Angin 6 m/s								
Model	Torsi (Nm)	Gaya (N)	Lift (N)	Drag (N)	Kec. Sudut (Rad/s)	TSR	Ct	C_p
S2 D2	0.0368	0.3238	0.0548	-0.2089	40.1077	0.3008	0.3029	0.0911
S2 D3	0.0405	0.3280	0.0555	-0.1991	34.4109	0.2581	0.2598	0.0671
S2 D4	0.0463	0.3775	0.0571	-0.2333	42.3068	0.3173	0.3195	0.1014
S3 D2	0.0478	0.4310	0.0492	-0.1609	30.2116	0.2266	0.2281	0.0517
S3 D3	0.0515	0.4503	0.0463	-0.1660	31.8872	0.2392	0.2408	0.0576
S3 D4	0.0559	0.4704	0.0476	-0.1671	48.7994	0.3660	0.3685	0.1349
S4 D2	0.0475	0.4112	0.0201	-0.0756	29.0807	0.2181	0.2196	0.0479
S4 D3	0.0522	0.4571	0.0188	-0.0926	31.7091	0.2378	0.2394	0.0569
S4 D4	0.0575	0.4825	0.0205	-0.0961	27.4575	0.2059	0.2073	0.0427

1.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 8 m/s								
Model	Torsi (Nm)	Gaya (N)	Lift (N)	Drag (N)	Kec. Sudut (Rad/s)	TSR	Ct	Cp
S2 D2	0.0688	0.6103	0.0973	-0.4107	53.8050	0.3027	0.3047	0.0922
S2 D3	0.0778	0.6389	0.0957	-0.4148	66.8845	0.3762	0.3788	0.1425
S2 D4	0.0849	0.6959	0.1227	-0.4458	71.6702	0.4031	0.4059	0.1636
S3 D2	0.0885	0.7944	0.0793	-0.3210	43.4587	0.2445	0.2461	0.0602
S3 D3	0.0940	0.8260	0.0937	-0.3218	75.6914	0.4258	0.4287	0.1825
S3 D4	0.1019	0.8631	0.0969	-0.3443	72.9373	0.4103	0.4131	0.1695
S4 D2	0.0887	0.7444	0.0359	-0.1668	42.1078	0.2369	0.2385	0.0565
S4 D3	0.0955	0.8408	0.0393	-0.1787	57.5540	0.3237	0.3259	0.1055
S4 D4	0.1050	0.8866	0.0377	-0.1854	50.6006	0.2846	0.2866	0.0816
Kecepatan Angin 10 m/s								
Model	Torsi (Nm)	Gaya (N)	Lift (N)	Drag (N)	Kec. Sudut (Rad/s)	TSR	Ct	Cp
S2 D2	0.1101	0.9808	0.1927	-0.6731	65.3765	0.2942	0.2962	0.0871
S2 D3	0.1204	1.0348	0.1658	-0.6908	81.9956	0.3690	0.3715	0.1371
S2 D4	0.1328	1.1219	0.1657	-0.7456	74.2987	0.3343	0.3366	0.1125
S3 D2	0.1461	1.2744	0.1562	-0.5112	74.4872	0.3352	0.3375	0.1131
S3 D3	0.1508	1.3277	0.1522	-0.5291	87.7552	0.3949	0.3976	0.1570
S3 D4	0.1625	1.3806	0.1621	-0.5638	81.5557	0.3670	0.3695	0.1356
S4 D2	0.1346	1.1611	0.0573	-0.1484	57.8053	0.2601	0.2619	0.0681
S4 D3	0.1535	1.3556	0.0688	-0.3015	71.8378	0.3233	0.3255	0.1052
S4 D4	0.1714	1.4578	0.0941	-0.3159	71.6283	0.3223	0.3245	0.1046

LAMPIRAN II

2.1. Nilai gaya pada setiap sudut azimuth

Kecepatan Angin 4 m/s									
Sudut	Nilai Gaya (N)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.1483	0.1643	0.1725	0.1725	0.2256	0.1928	0.1572	0.1713	0.1610
30	0.1365	0.1513	0.1646	0.2033	0.1972	0.2343	0.2144	0.2340	0.2437
60	0.0926	0.0855	0.1272	0.2126	0.2102	0.2236	0.1935	0.1831	0.2121
90	0.0797	0.0920	0.0875	0.1360	0.1465	0.1420	0.1707	0.1793	0.1730
120	0.1768	0.1660	0.1985	0.1953	0.1953	0.2147	0.2235	0.2184	0.2489
150	0.1629	0.1698	0.1900	0.1985	0.2158	0.2276	0.1862	0.1960	0.2106
180	0.1465	0.1735	0.1730	0.1907	0.2102	0.2140	0.1576	0.1786	0.1731
210	0.1383	0.1490	0.1650	0.1263	0.1453	0.1547	0.2140	0.2299	0.2490
240	0.0907	0.1014	0.1262	0.2007	0.1901	0.2127	0.1913	0.1861	0.2105
270	0.0942	0.0937	0.0873	0.1981	0.2140	0.2059	0.1709	0.1870	0.1728
300	0.1750	0.1672	0.1980	0.2093	0.2108	0.2326	0.2239	0.2223	0.2482
330	0.1616	0.1688	0.1897	0.1208	0.1431	0.1484	0.1800	0.1948	0.2111

2.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 6 m/s									
Sudut	Nilai Gaya (N)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.3264	0.3709	0.3634	0.3974	0.4391	0.4306	0.3580	0.3910	0.3710
30	0.3131	0.3459	0.3738	0.4643	0.4846	0.5306	0.5003	0.5541	0.5748
60	0.2749	0.2238	0.3404	0.5098	0.5009	0.5198	0.4343	0.4249	0.4816
90	0.1902	0.2238	0.2233	0.3381	0.3797	0.3580	0.3900	0.4111	0.3981
120	0.4394	0.4239	0.4959	0.4501	0.4384	0.5024	0.5489	0.5025	0.5776
150	0.4000	0.4286	0.4564	0.4601	0.4931	0.5129	0.4175	0.4523	0.4836
180	0.3269	0.3937	0.3908	0.4574	0.5003	0.4953	0.0377	0.4112	0.3973
210	0.3150	0.3370	0.3747	0.3352	0.3776	0.4062	0.4995	0.5339	0.5788
240	0.2724	0.2613	0.3402	0.4573	0.4379	0.4918	0.4312	0.4191	0.4763
270	0.1903	0.0801	0.2227	0.4590	0.4850	0.4669	0.3895	0.4296	0.3966
300	0.4390	0.4203	0.4950	0.4983	0.5011	0.5466	0.5064	0.5113	0.5754
330	0.3977	0.4268	0.4538	0.3447	0.3653	0.3839	0.4207	0.4444	0.4789

2.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 8 m/s									
Sudut	Nilai Gaya (N)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.5828	0.6603	0.6483	0.7221	0.8046	0.7813	0.6450	0.7148	0.6748
30	0.5655	0.5376	0.6327	0.7706	0.8624	0.9549	0.9370	1.0317	1.0827
60	0.5780	0.5547	0.6333	0.9499	0.9086	0.9576	0.7861	0.7695	0.8698
90	0.3699	0.4469	0.4528	0.6458	0.7104	0.6815	0.7065	0.7517	0.7212
120	0.8381	0.8138	0.9487	0.8175	0.8054	0.9158	0.9335	0.9184	1.0869
150	0.7294	0.7720	0.8220	0.8565	0.8996	0.9226	0.7549	0.8260	0.8624
180	0.5836	0.7047	0.6968	0.8608	0.9072	0.9185	0.6478	0.7517	0.7201
210	0.5685	0.6019	0.8084	0.6635	0.7108	0.7692	0.9348	0.9883	1.0888
240	0.5750	0.5484	0.5013	0.8262	0.8048	0.8898	0.1913	0.7857	0.8663
270	0.3696	0.4613	0.4429	0.8478	0.8920	0.8317	0.7051	0.7861	0.7201
300	0.8374	0.7969	0.9457	0.9281	0.9108	1.0101	0.9352	0.9365	1.0810
330	0.7252	0.7685	0.8179	0.6439	0.6950	0.7242	0.7553	0.8291	0.8650

2.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 10 m/s									
Sudut	Nilai Gaya (N)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.9134	1.0217	1.0170	1.1514	1.2692	1.2309	0.1572	1.1337	1.0746
30	0.8883	0.9760	1.0496	1.3116	1.4068	1.5234	1.5338	1.6727	1.7445
60	0.9096	0.8962	0.9895	1.5134	1.4838	1.5574	1.2806	1.2242	1.4167
90	0.6277	0.7538	0.7709	1.0534	1.1513	1.0921	1.1236	1.1934	1.1458
120	1.3899	1.2989	1.5556	1.3040	1.2699	1.4530	1.4866	1.4876	1.7516
150	1.1572	1.2240	1.3051	1.3451	1.4193	1.4526	1.2433	1.4137	1.4097
180	0.9147	1.1063	1.0916	1.3603	1.4812	1.4995	1.0297	1.1911	1.1442
210	0.8930	0.9438	1.0541	1.0756	1.1506	1.2475	1.5233	1.5935	1.7538
240	0.9092	0.8596	0.9901	1.3127	1.2667	1.4040	1.1322	1.2629	1.7538
270	0.6268	0.7779	0.7684	1.3304	1.4208	1.3065	0.6464	1.2497	1.1450
300	1.3891	1.3430	1.5658	1.4911	1.4851	1.6321	1.5173	1.5224	1.7425
330	1.1510	1.2163	1.3050	1.0433	1.1276	1.1682	1.2595	1.3224	1.4114

LAMPIRAN III

3.1. Nilai torsi pada setiap sudut azimuth

Kecepatan Angin 4 m/s									
Sudut	Nilai Torsi (Nm)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.0156	0.0191	0.0205	0.0180	0.0228	0.0218	0.0165	0.0196	0.0202
30	0.0158	0.0187	0.0213	0.0224	0.0250	0.0284	0.0235	0.0265	0.0290
60	0.0118	0.0106	0.0168	0.0241	0.0239	0.0268	0.0224	0.0210	0.0258
90	0.0096	0.0119	0.0108	0.0158	0.0175	0.0168	0.0196	0.0210	0.0203
120	0.0202	0.0186	0.0239	0.0225	0.0214	0.0260	0.0253	0.0241	0.0295
150	0.0184	0.0201	0.0234	0.0222	0.0252	0.0275	0.0202	0.0230	0.0256
180	0.0156	0.0204	0.0205	0.0201	0.0238	0.0244	0.0166	0.0209	0.0203
210	0.0160	0.0180	0.0214	0.0147	0.0174	0.0199	0.0235	0.0259	0.0296
240	0.0117	0.0122	0.0167	0.0228	0.0213	0.0255	0.0222	0.0210	0.0256
270	0.0096	0.0149	0.0108	0.0220	0.0251	0.0236	0.0196	0.0222	0.0203
300	0.0200	0.0189	0.0238	0.0241	0.0239	0.0280	0.0253	0.0248	0.0295
330	0.0183	0.0200	0.0234	0.0136	0.0172	0.0192	0.0201	0.0226	0.0257

3.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 6 m/s									
Sudut	Nilai Torsi (Nm)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.0347	0.0427	0.0461	0.0411	0.0487	0.0503	0.0374	0.0445	0.0463
30	0.0364	0.0429	0.0484	0.0511	0.0567	0.0642	0.0542	0.0627	0.0680
60	0.0332	0.0267	0.0429	0.0571	0.0565	0.0616	0.0502	0.0486	0.0581
90	0.0225	0.0283	0.0266	0.0386	0.0443	0.0414	0.0427	0.0482	0.0464
120	0.0493	0.0524	0.0586	0.0515	0.0487	0.0605	0.0572	0.0550	0.0682
150	0.0447	0.0501	0.0553	0.0510	0.0575	0.0618	0.0377	0.0529	0.0583
180	0.0347	0.0463	0.0462	0.0476	0.0564	0.0560	0.0377	0.0479	0.0464
210	0.0366	0.0409	0.0485	0.0381	0.0442	0.0507	0.0547	0.0601	0.0684
240	0.0330	0.0305	0.0429	0.0518	0.0486	0.0584	0.0498	0.0472	0.0576
270	0.0225	0.0290	0.0266	0.0506	0.0568	0.0532	0.0445	0.0513	0.0463
300	0.0493	0.0467	0.0585	0.0566	0.0565	0.0653	0.0571	0.0569	0.0681
330	0.0446	0.0499	0.0550	0.0392	0.0430	0.0474	0.0468	0.0513	0.0578

3.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 8 m/s									
Sudut	Nilai Torsi (Nm)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.0618	0.0758	0.0821	0.0744	0.0888	0.0907	0.0675	0.0807	0.0835
30	0.0659	0.0770	0.0866	0.0918	0.1007	0.1154	0.1022	0.1163	0.1269
60	0.0678	0.0642	0.0787	0.1055	0.1022	0.1121	0.0964	0.0878	0.1045
90	0.0430	0.0550	0.0525	0.0729	0.0823	0.0779	0.0804	0.0878	0.0838
120	0.0932	0.0881	0.1108	0.0931	0.0888	0.1100	0.1047	0.0999	0.1273
150	0.0815	0.0900	0.0990	0.0955	0.1047	0.1104	0.0838	0.0963	0.1038
180	0.0618	0.0828	0.0823	0.0895	0.1020	0.1032	0.0679	0.0873	0.0837
210	0.0662	0.0922	0.0869	0.0750	0.0823	0.0949	0.1020	0.1106	0.1276
240	0.0675	0.0624	0.0787	0.0932	0.0887	0.1053	0.0901	0.0877	0.1040
270	0.0430	0.0571	0.0516	0.0935	0.1040	0.0947	0.0802	0.0934	0.0837
300	0.0931	0.0878	0.1105	0.1045	0.1024	0.1198	0.1048	0.1037	0.1268
330	0.0811	0.1008	0.0989	0.0727	0.0807	0.0881	0.0838	0.0952	0.1039

3.1. Lanjutan

Kecepatan Angin 10 m/s									
Sudut	Nilai Torsi (Nm)								
	S2 D2	S2 D3	S2 D4	S3 D2	S3 D3	S3 D4	S4 D2	S4 D3	S4 D4
0	0.0967	0.1171	0.1284	0.1389	0.1395	0.1423	0.0165	0.1274	0.1323
30	0.1035	0.1212	0.1362	0.1443	0.1641	0.1839	0.1668	0.1880	0.2037
60	0.1062	0.1033	0.1229	0.1673	0.1664	0.1806	0.1461	0.1394	0.1690
90	0.0719	0.0914	0.0878	0.1183	0.1329	0.1245	0.1275	0.1390	0.1327
120	0.1534	0.1437	0.1809	0.1930	0.1396	0.1745	0.1661	0.1609	0.2044
150	0.1292	0.1427	0.1242	0.1500	0.1655	0.1744	0.1376	0.1636	0.1682
180	0.0967	0.1301	0.1288	0.1414	0.1661	0.1678	0.1076	0.1383	0.1326
210	0.1041	0.1143	0.1366	0.1210	0.1328	0.1533	0.1658	0.1775	0.2047
240	0.1061	0.0975	0.1229	0.1476	0.1392	0.1660	0.1448	0.1402	0.2047
270	0.0718	0.0952	0.0876	0.1466	0.1659	0.1487	0.1273	0.1486	0.1327
300	0.1533	0.1468	0.1801	0.1670	0.1666	0.1928	0.1691	0.1679	0.2036
330	0.1287	0.1416	0.1567	0.1174	0.1305	0.1411	0.1400	0.1514	0.1684

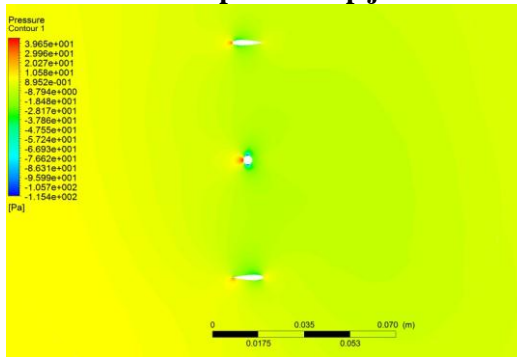
LAMPIRAN IV

4.1. Nilai torsi aerodinamika pada setiap jenis turbin

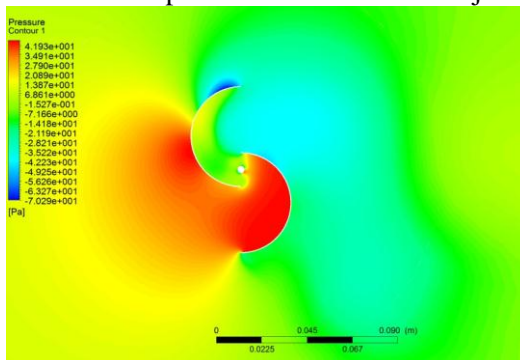
Kecepatan angin 4 m/s		Kecepatan angin 6 m/s		Kecepatan angin 8 m/s		Kecepatan angin 10 m/s	
Model	Torsi Aerodinamika	Model	Torsi Aerodinamika	Model	Torsi Aerodinamika	Model	Torsi Aerodinamika
S2 D2	0.0025	S2 D2	0.0050	S2 D2	0.0090	S2 D2	0.0137
S2 D3	0.0023	S2 D3	0.0043	S2 D3	0.0112	S2 D3	0.0172
S2 D4	0.0023	S2 D4	0.0053	S2 D4	0.0120	S2 D4	0.0155
S3 D2	0.0021	S3 D2	0.0038	S3 D2	0.0073	S3 D2	0.0156
S3 D3	0.0019	S3 D3	0.0040	S3 D3	0.0127	S3 D3	0.0184
S3 D4	0.0020	S3 D4	0.0061	S3 D4	0.0122	S3 D4	0.0171
S4 D2	0.0015	S4 D2	0.0036	S4 D2	0.0070	S4 D2	0.0121
S4 D3	0.0019	S4 D3	0.0040	S4 D3	0.0096	S4 D3	0.0150
S4 D4	0.0008	S4 D4	0.0034	S4 D4	0.0085	S4 D4	0.0150

LAMPIRAN V

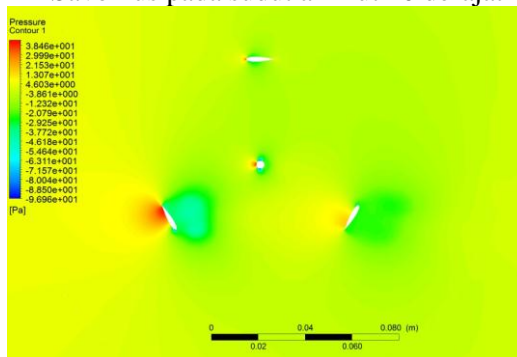
5.1. Kontur tekanan aliran pada setiap jumlah sudu



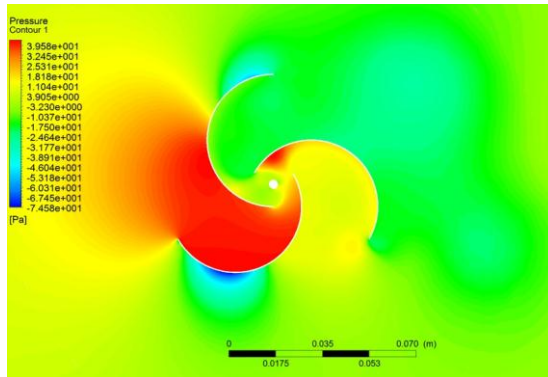
2 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



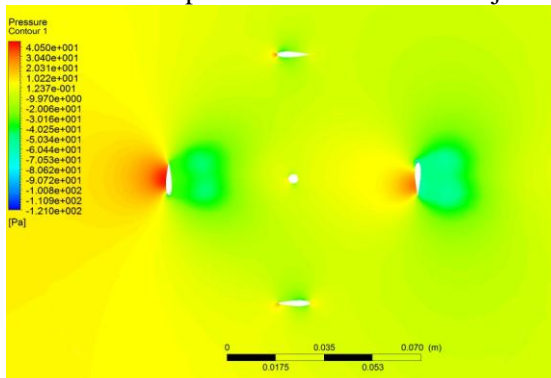
2 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



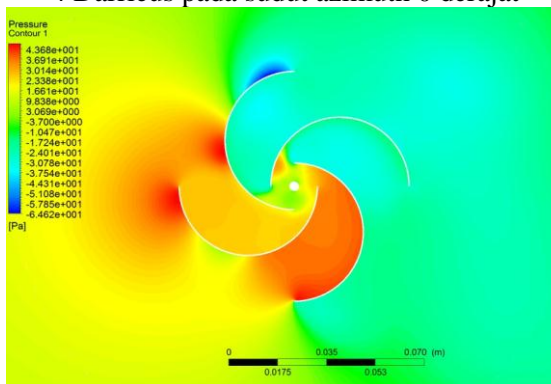
3 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



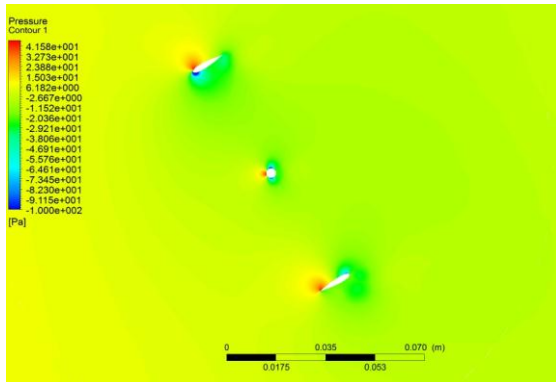
3 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



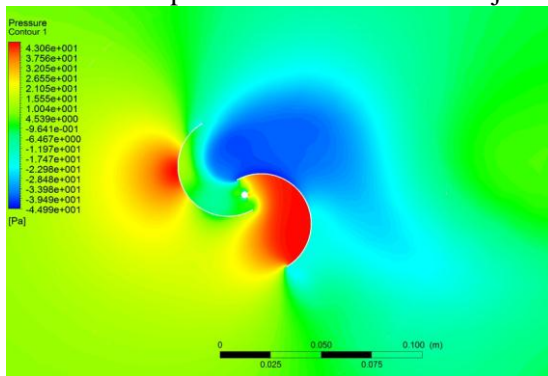
4 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



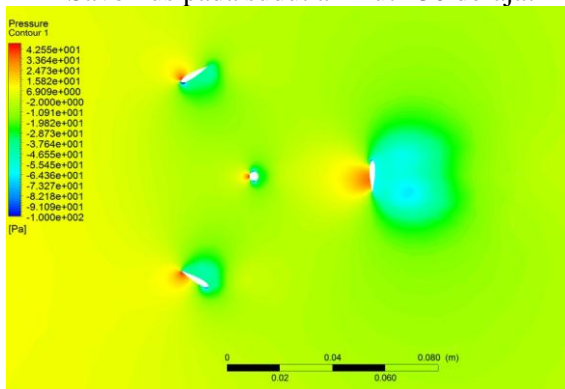
4 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



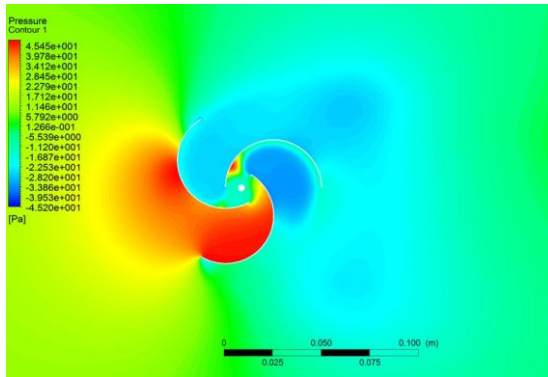
2 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



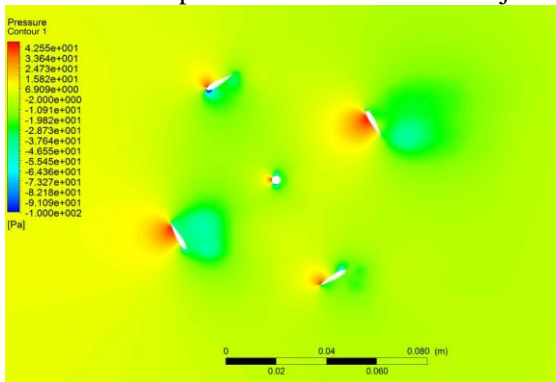
2 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



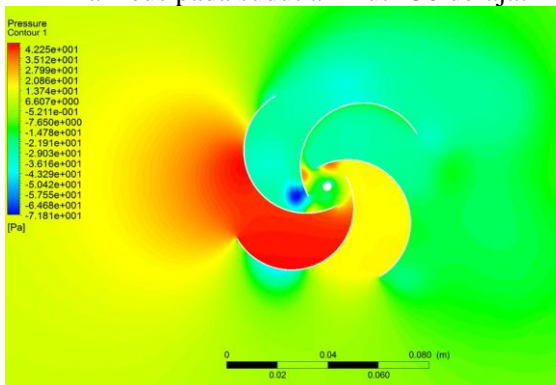
3 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



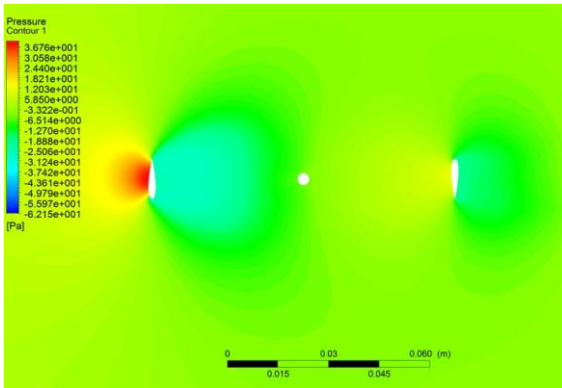
3 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



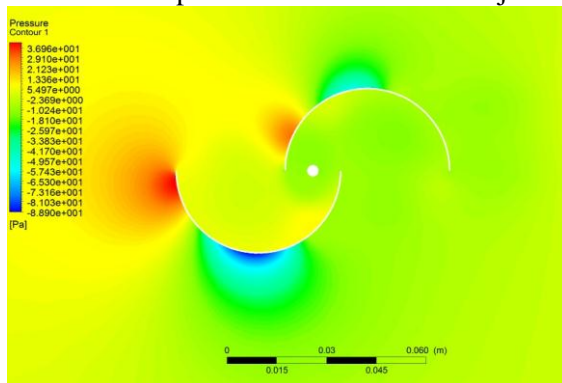
4 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



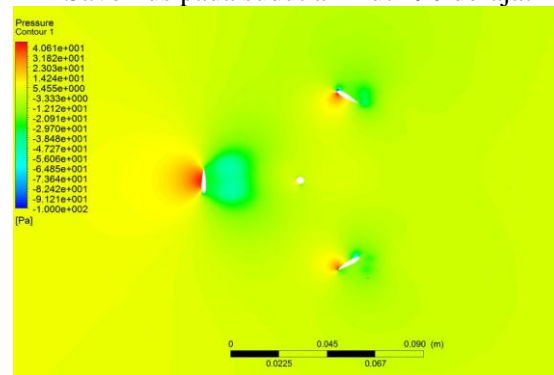
4 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



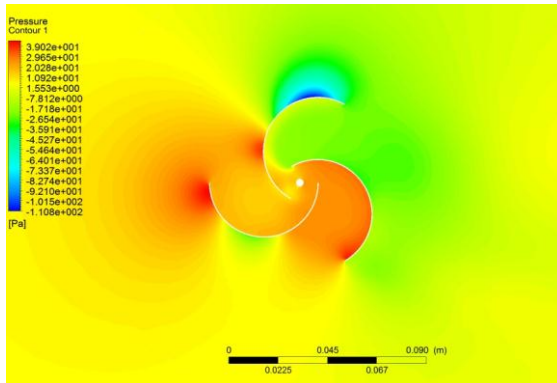
2 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



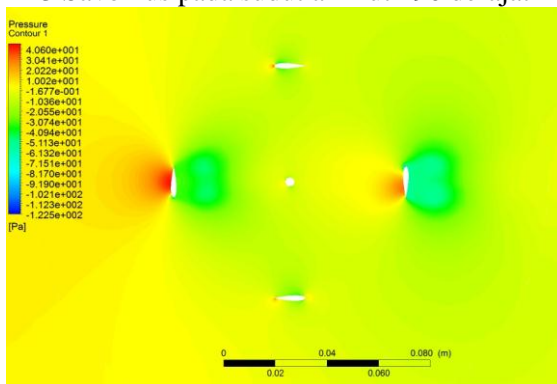
2 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



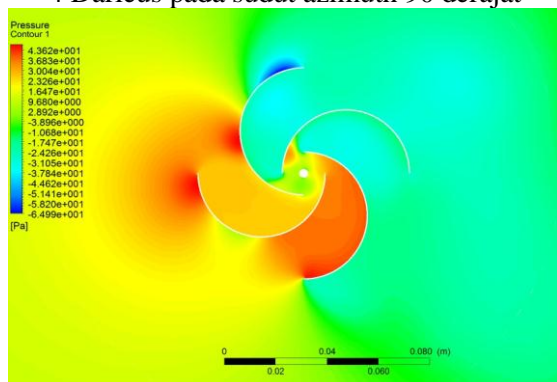
3 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



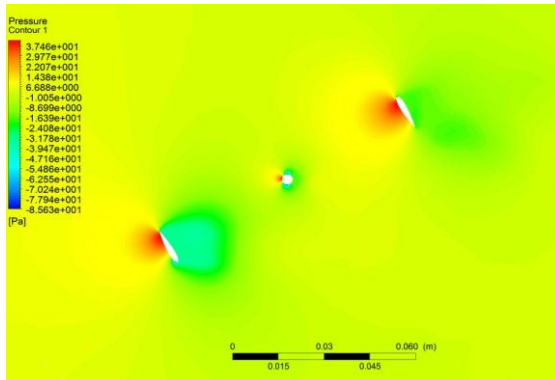
3 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



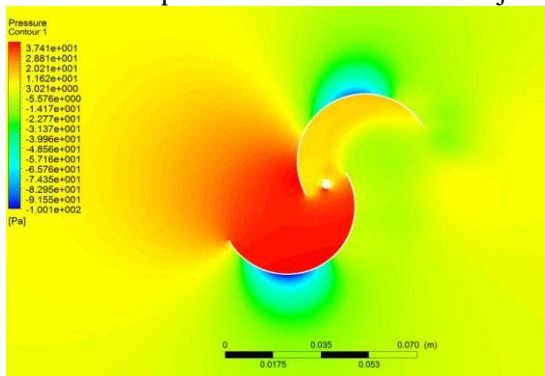
4 Darieus pada sudut azimuth 90 derajat



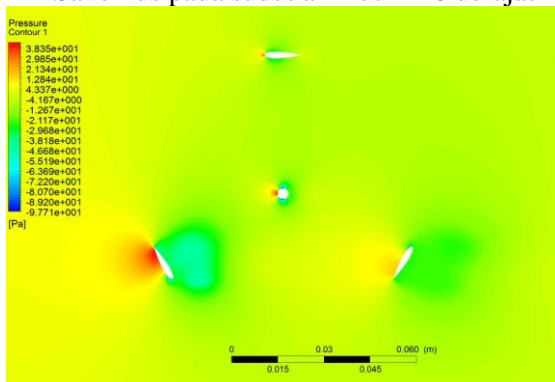
4 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



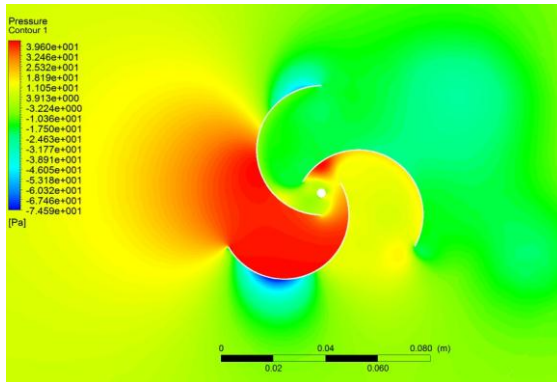
2 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



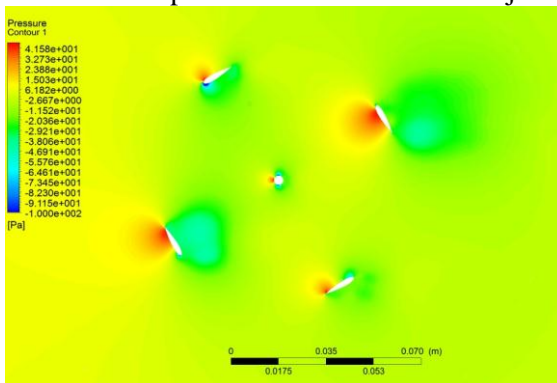
2 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



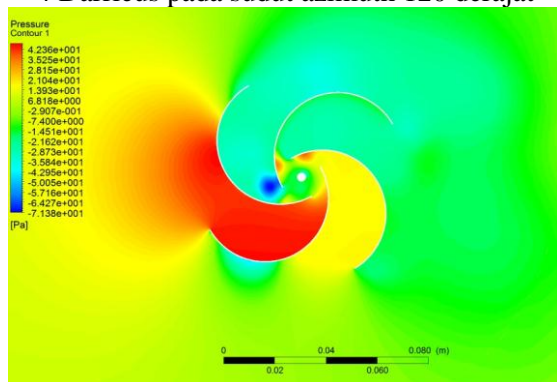
3 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



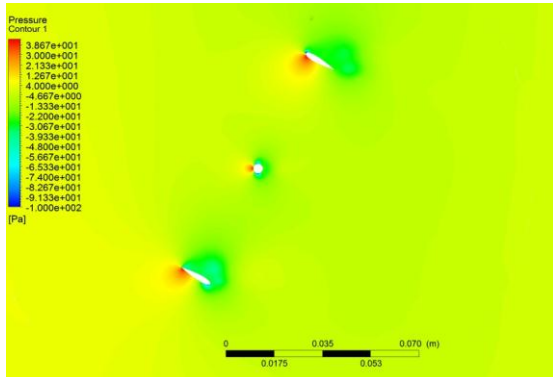
3 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



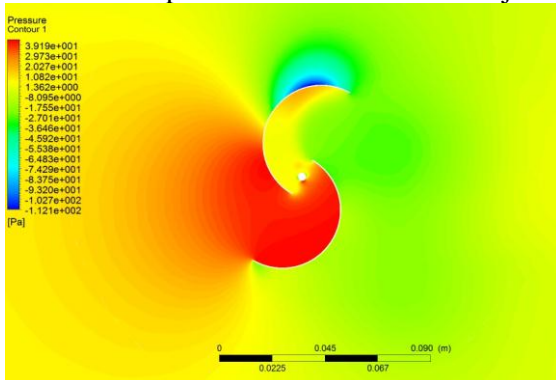
4 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



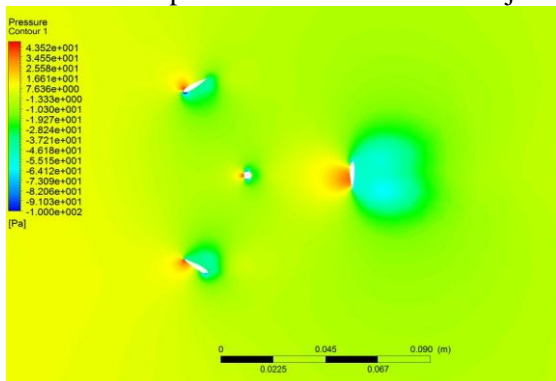
4 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



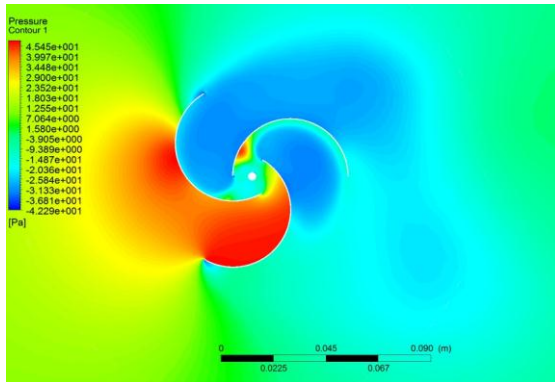
2 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



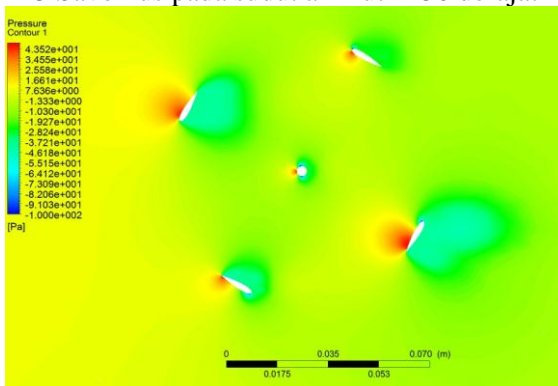
2 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat



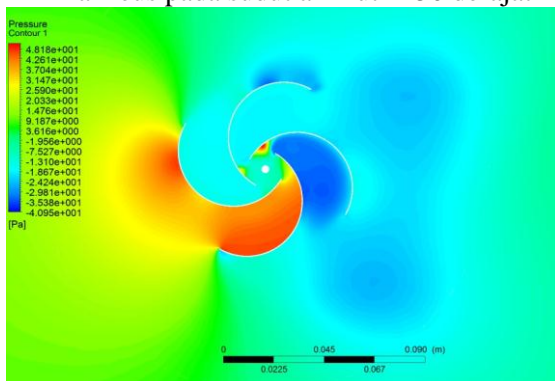
3 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



3 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat

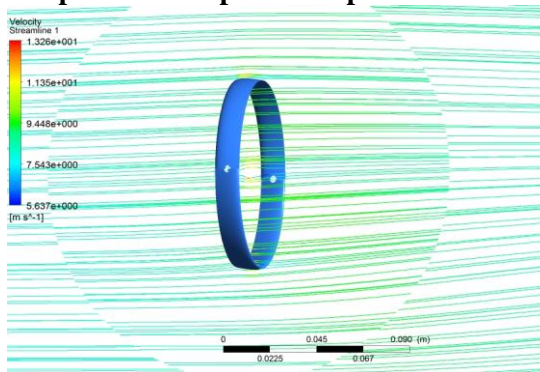


4 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat

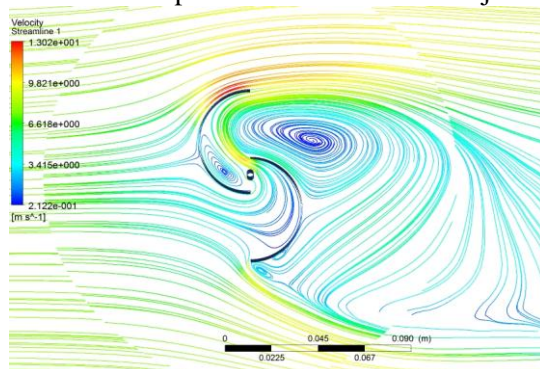


4 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat

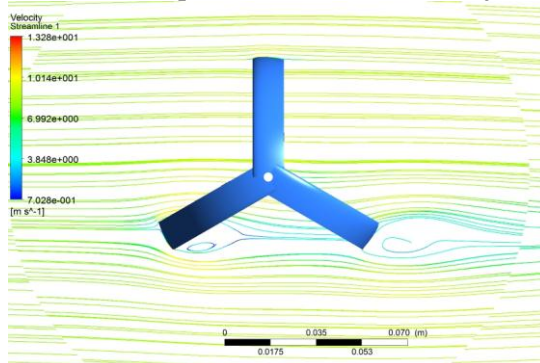
5.2. Pola kecepatan aliran pada setiap model turbin



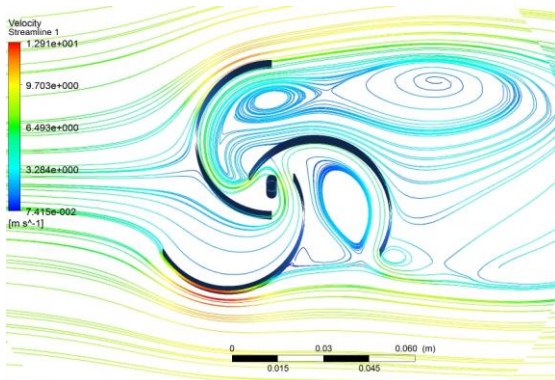
2 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



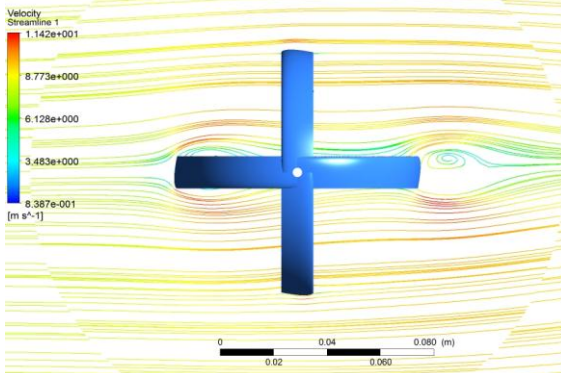
2 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



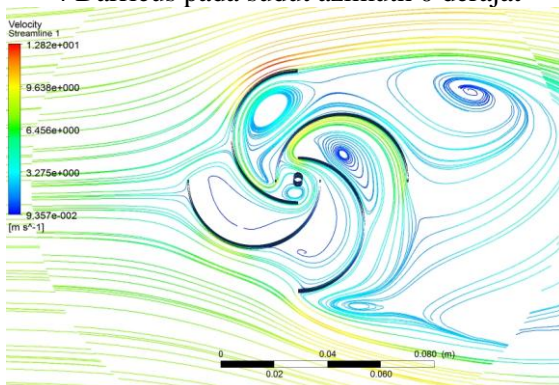
3 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



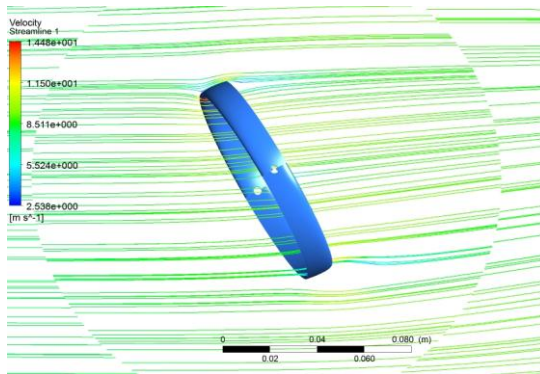
3 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



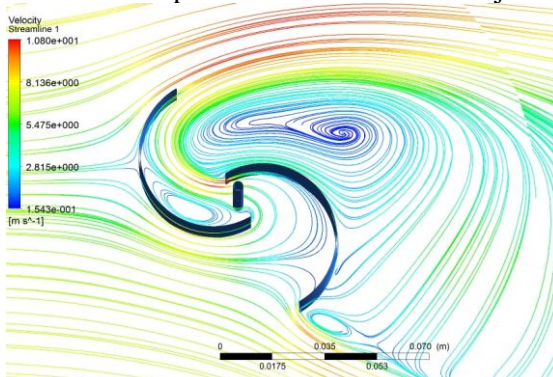
4 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



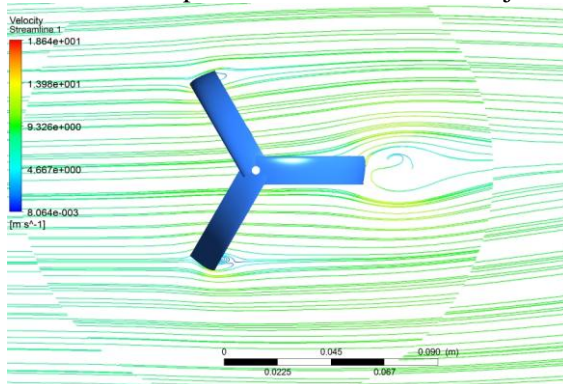
4 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



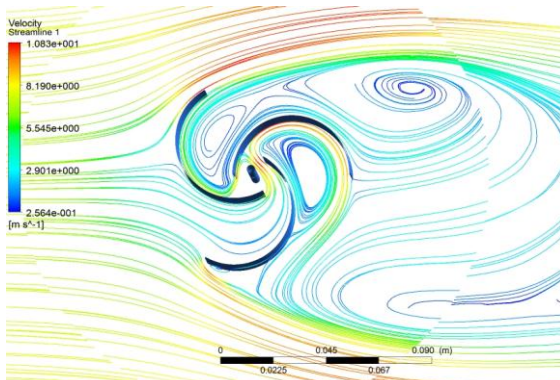
2 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



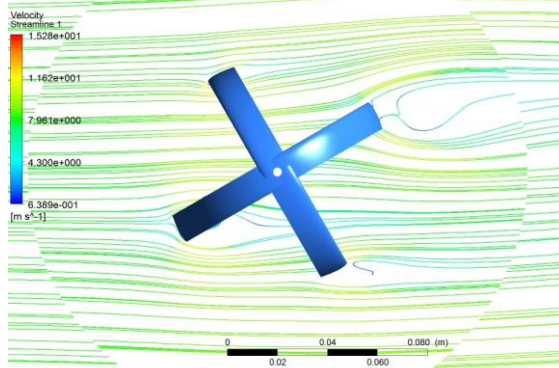
2 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



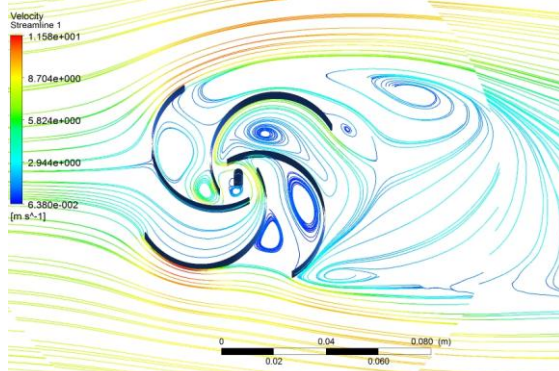
3 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



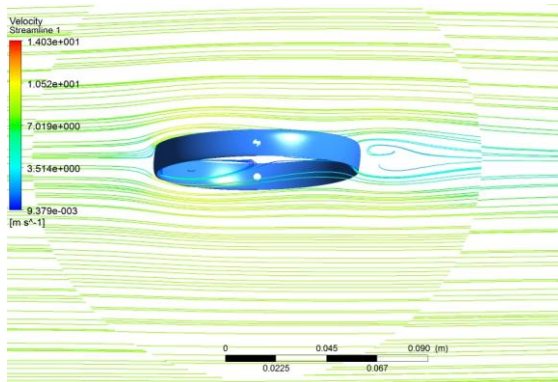
3 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



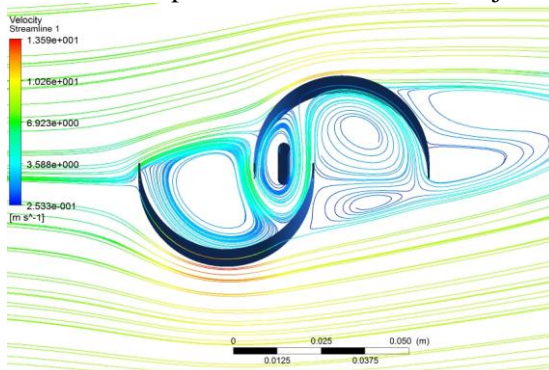
4 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



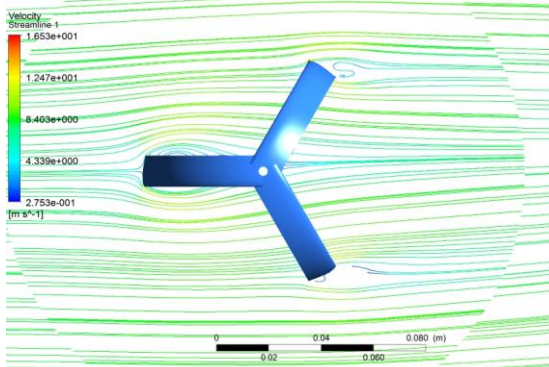
4 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



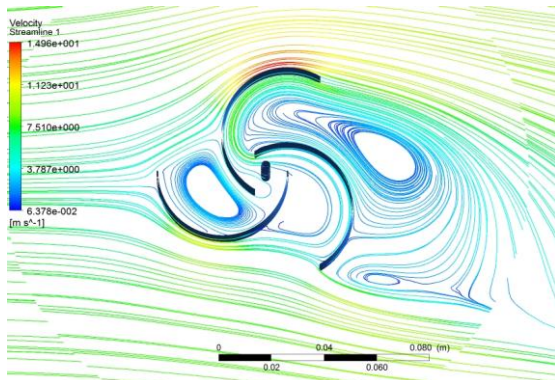
2 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



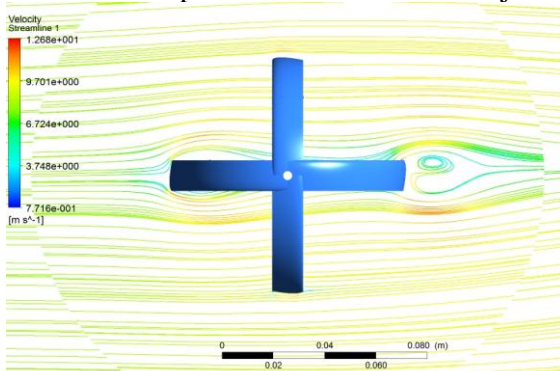
2 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



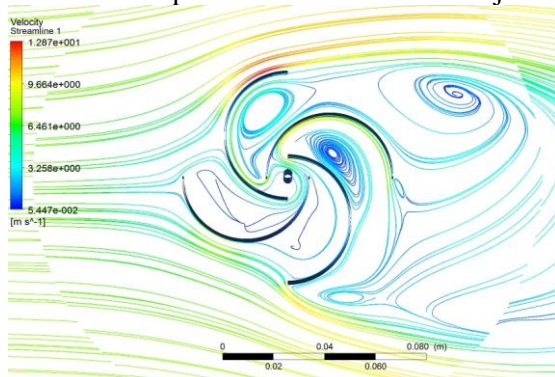
3 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



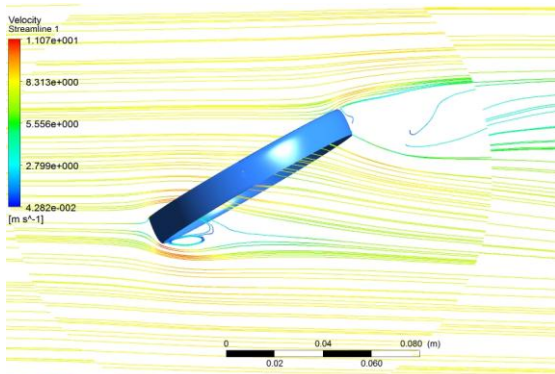
3 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



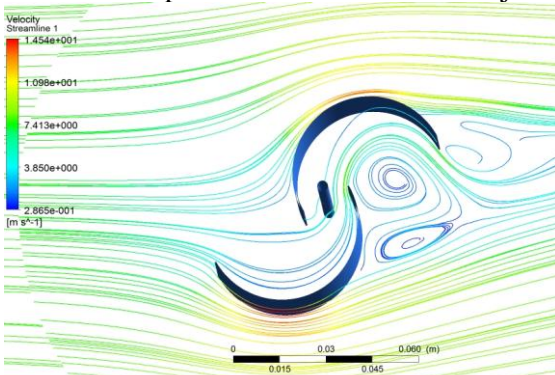
4 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



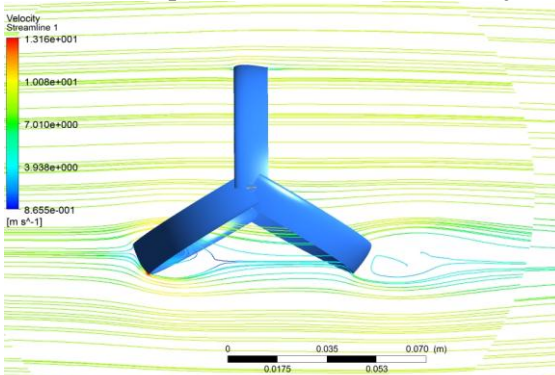
4 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



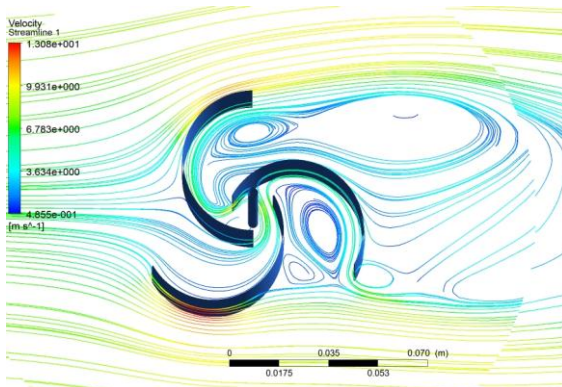
2 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



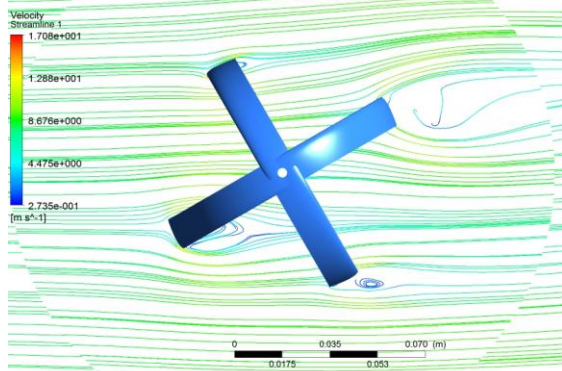
2 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



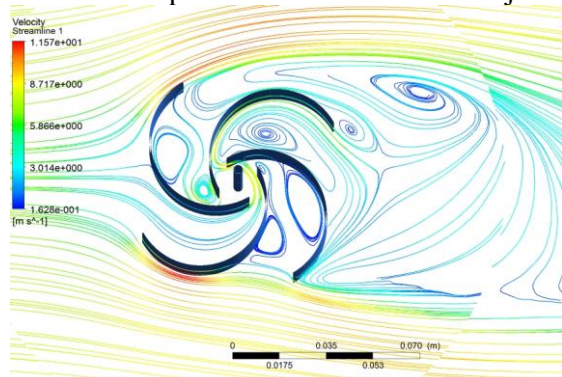
3 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



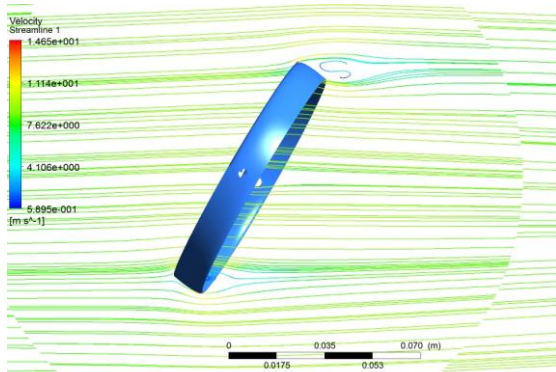
3 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



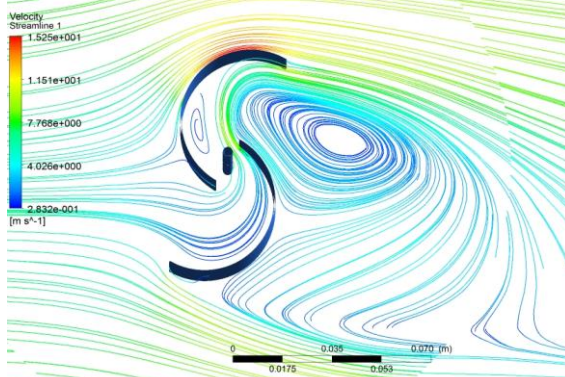
4 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



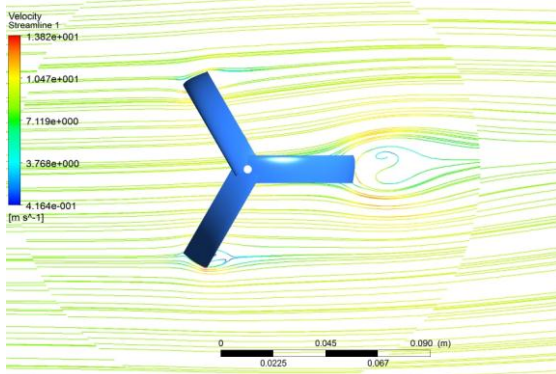
4 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



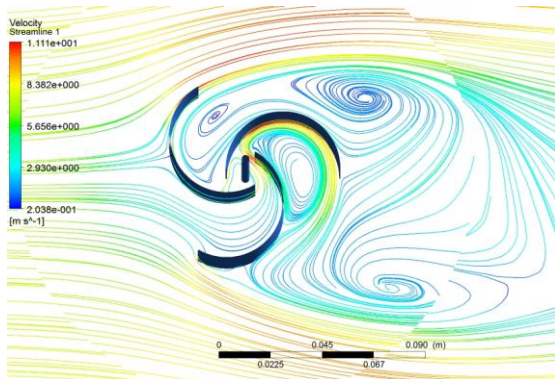
2 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



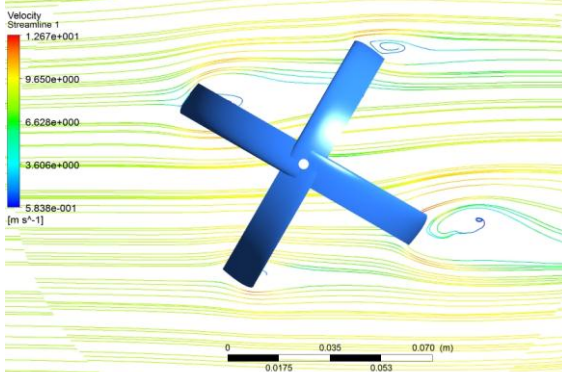
2 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat



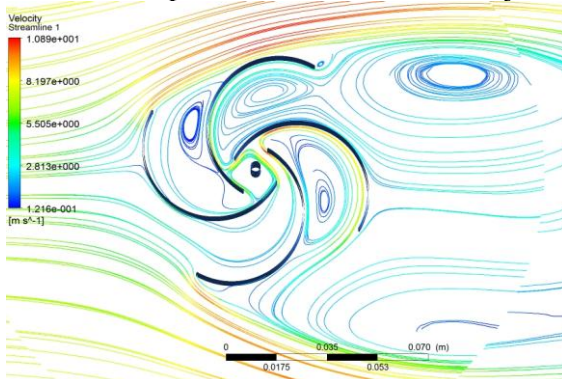
3 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



3 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat

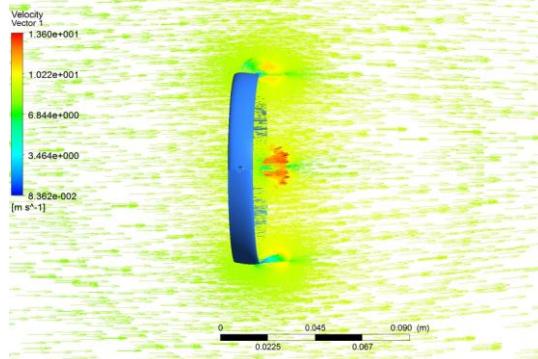


4 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat

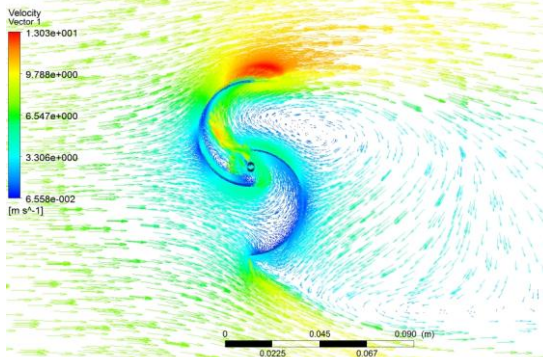


4 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat

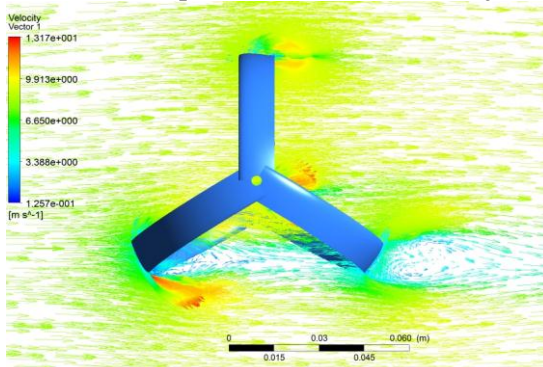
5.3. Vektor kecepatan aliran pada setiap model turbin



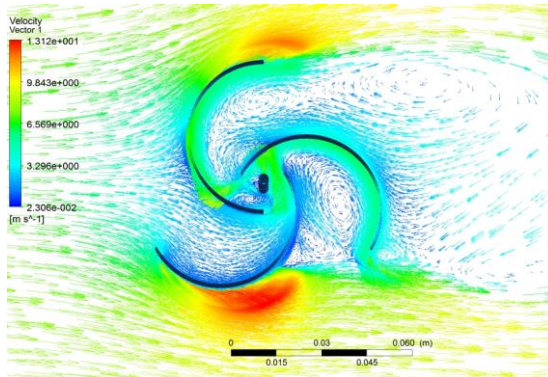
2 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



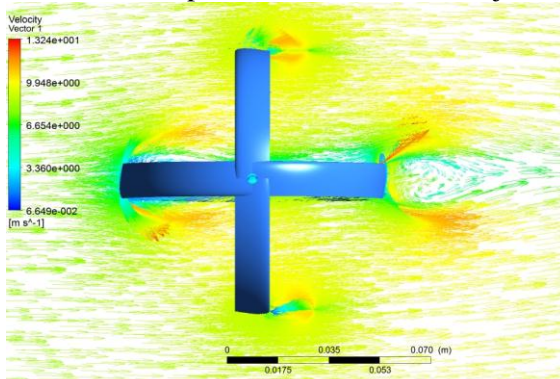
2 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



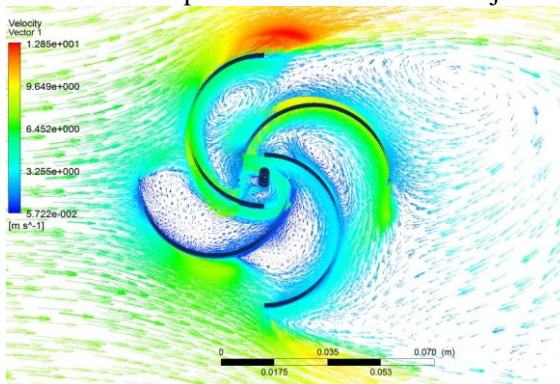
3 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



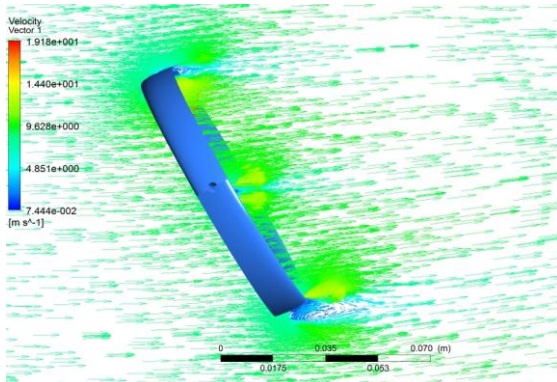
3 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



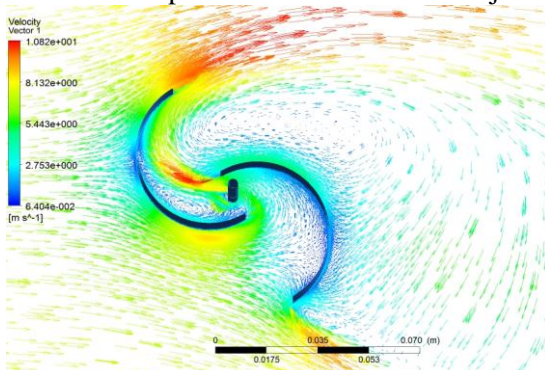
3 Darrieus pada sudut azimuth 0 derajat



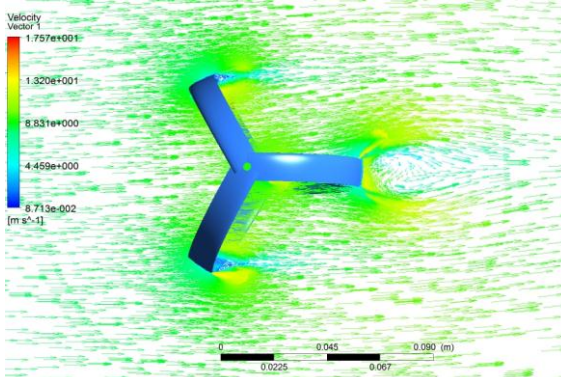
4 Savonius pada sudut azimuth 0 derajat



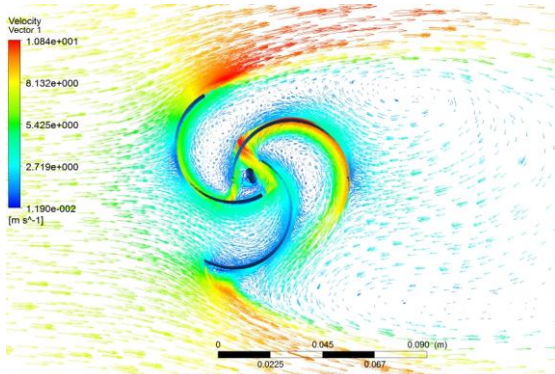
2 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



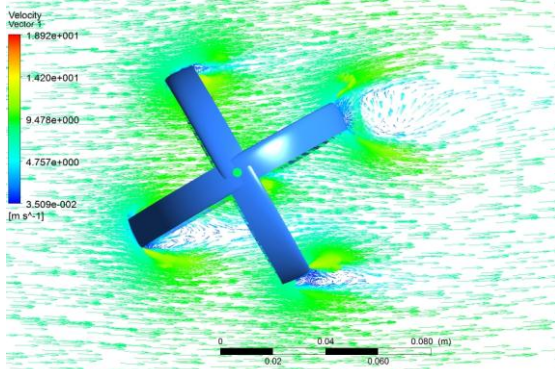
2 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



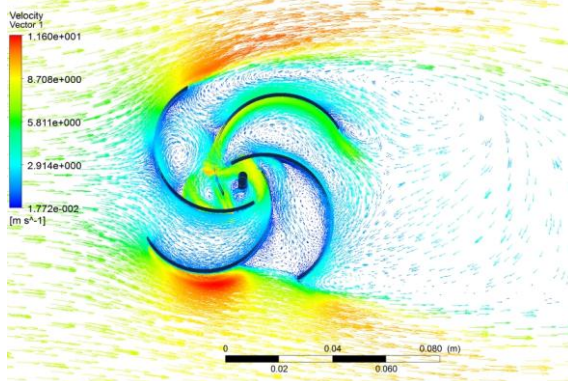
3 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



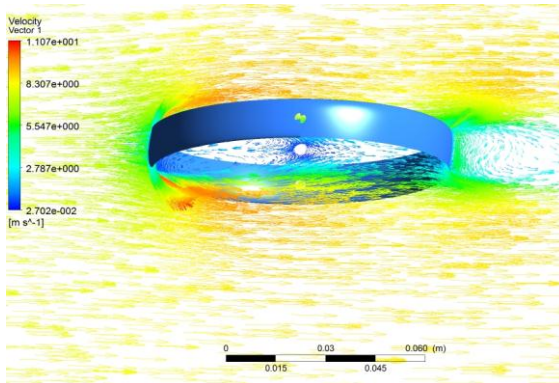
3 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



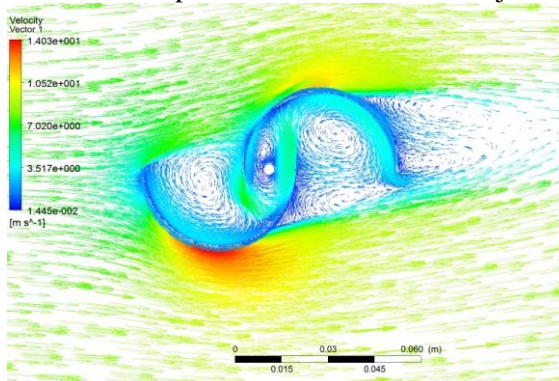
4 Darrieus pada sudut azimuth 30 derajat



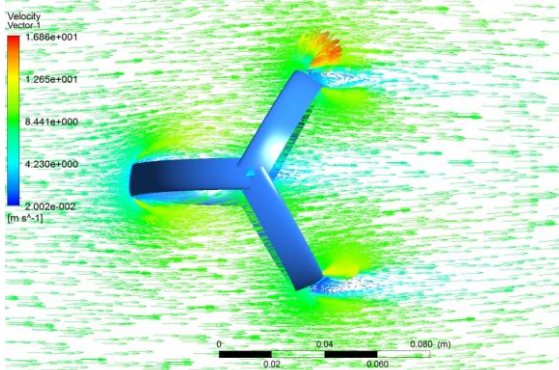
4 Savonius pada sudut azimuth 30 derajat



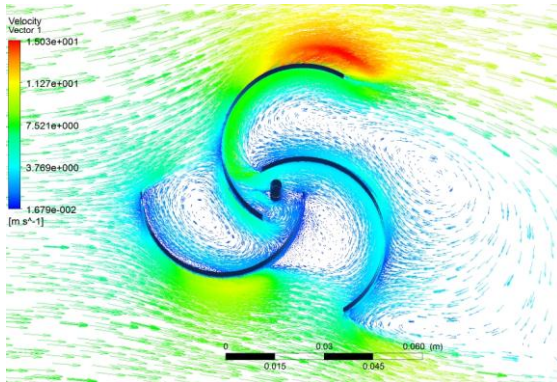
2 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



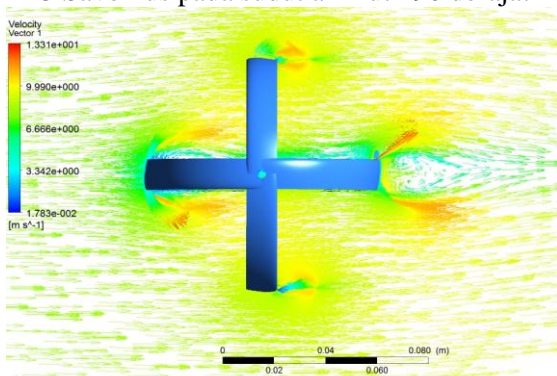
2 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



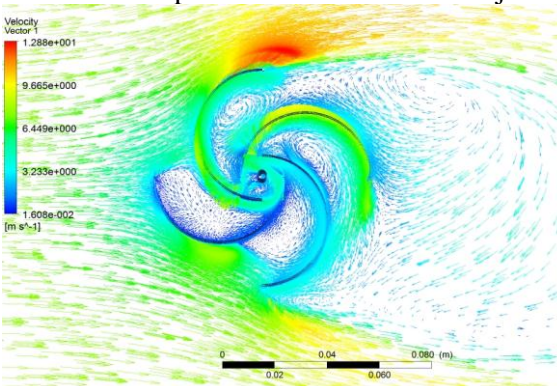
3 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



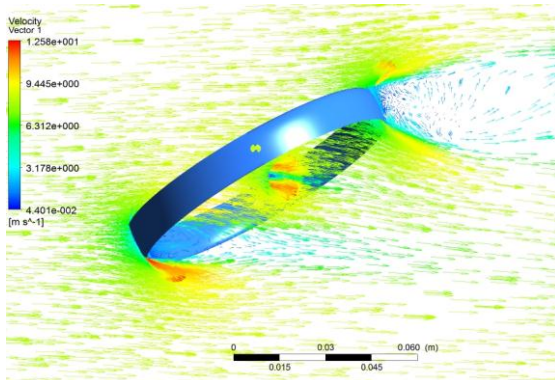
3 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



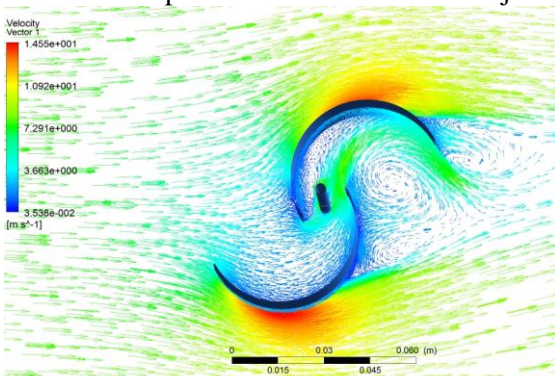
4 Darrieus pada sudut azimuth 90 derajat



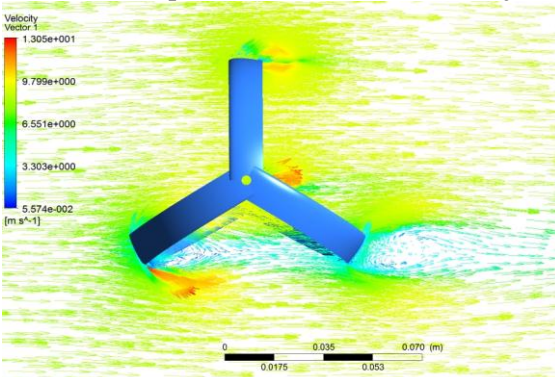
4 Savonius pada sudut azimuth 90 derajat



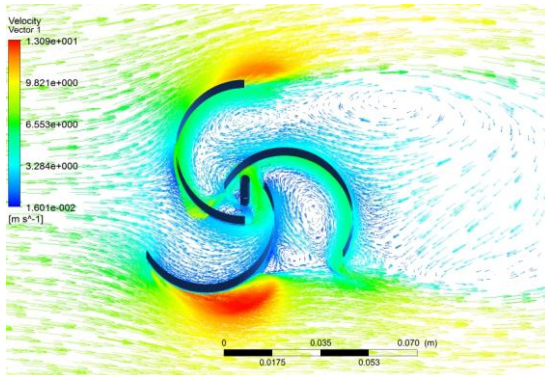
2 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



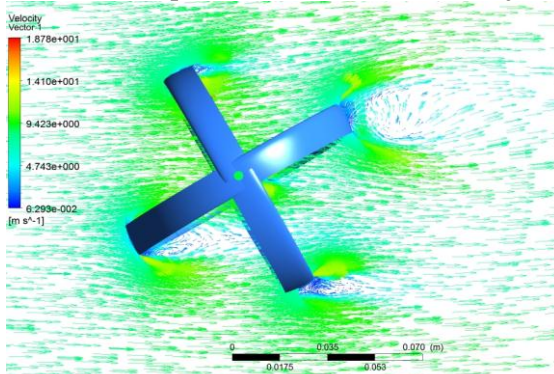
2 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



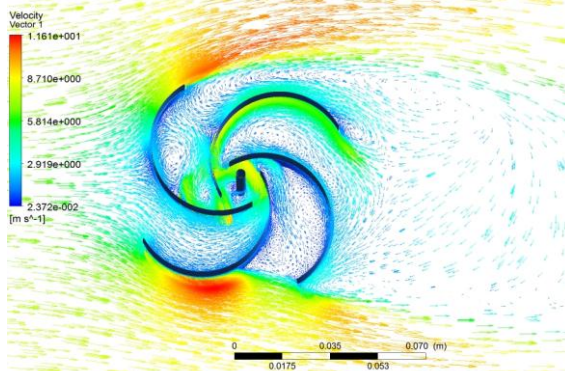
3 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



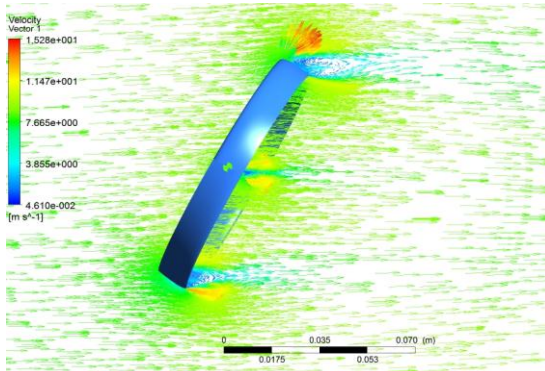
3 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



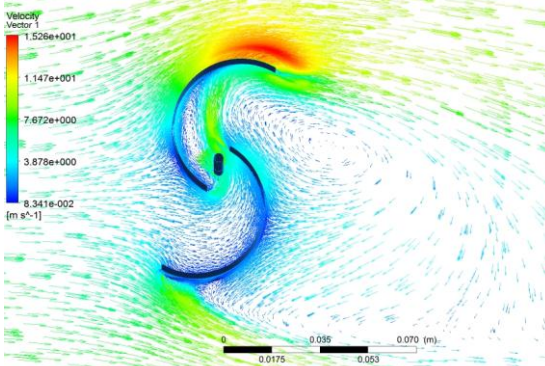
3 Darrieus pada sudut azimuth 120 derajat



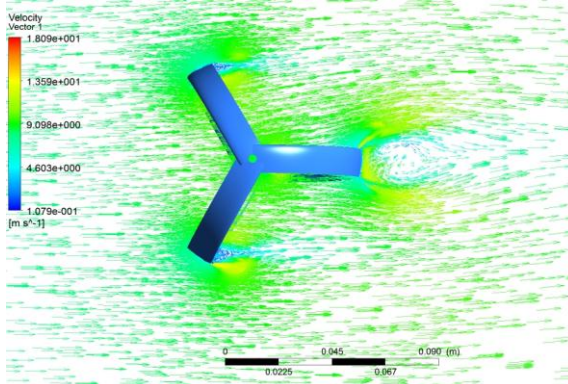
4 Savonius pada sudut azimuth 120 derajat



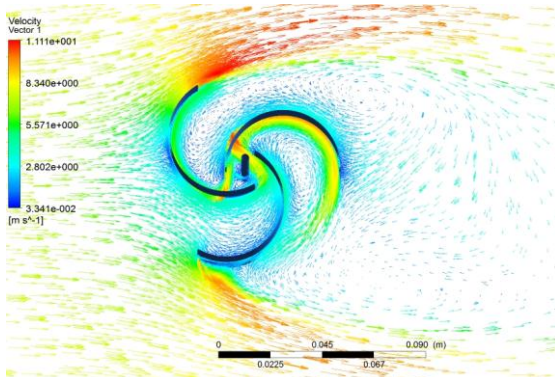
2 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



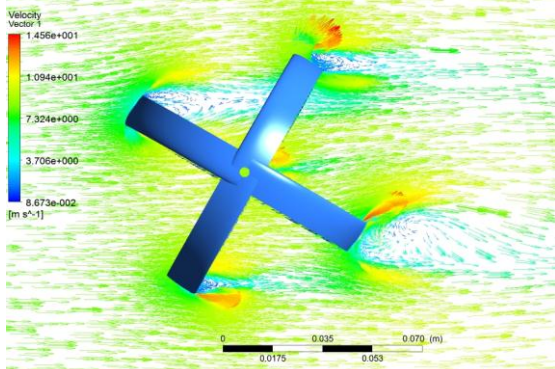
2 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat



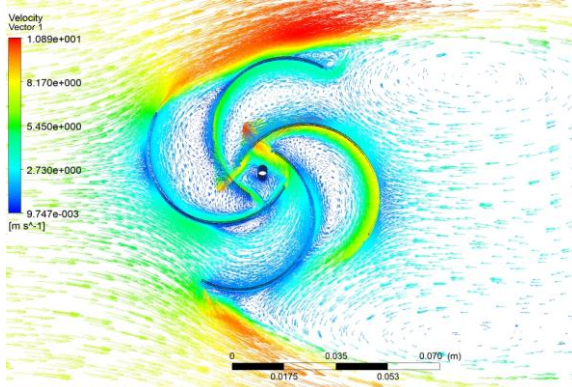
3 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



3 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat



4 Darrieus pada sudut azimuth 150 derajat



4 Savonius pada sudut azimuth 150 derajat

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 10 Agustus 1994 di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan di MI Pembangunan UIN Jakarta (2000-2006), MTs Pembangunan UIN Jakarta (2006-2009), dan SMAN 6 Jakarta (2009-2012). Penulis melanjutkan studinya di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam kegiatan non-akademik sebagai anggota UKM robotika ITS dan kepanitiaan ITS EXPO. Pengalaman *internship* penulis adalah melakukan analisa prinsip kerja Coriolis flowmeter dengan net oil computing transmitter pada aplikasi crude oil di PT. Pertamina EP Sangasanga. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik fardansentosa@gmail.com.